

С.В. КОВАЛЮХ,
В.Р. КОВАЛЮХ, канд. техн. наук
(Украина, Харьков, НПП "КВАР")

УНИВЕРСАЛЬНАЯ КОНУСНАЯ МЕЛЬНИЦА С РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Шаровая мельница (ШМ) является консервативным измельчительным агрегатом, который за полтора века практически не претерпел радикальных изменений. Это свидетельствует о достоинствах и незаменимости ШМ, а с учетом КПД, о серьезных недостатках. Проблема измельчения традиционно решалась не системно, а с позиций отдельных частных решений, на основе выбора: цикла и стадий измельчения; технологической схемы; профиля футеровки; классификации шаров; коэффициента заполнения и сортамента шаров и т.д.

Генезис недостатков – в жесткой структуре ШМ, которая не позволяет активно влиять на параметры процесса измельчения. Переход к плавно-переменной (интегральной) структуре ШМ позволяет не только радикально, но и системно 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 основных типов мельниц.

Таблица 1

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, 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 для всех 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), (2) и (3) позволяет сделать следующие выводы:

- производительность ШМ в основном зависит от рабочего объема, поскольку все остальные параметры практически постоянны и небольшие по величине;
- 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;

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

Таким образом, во всех отраслях промышленности не учтен феномен – влияния частоты вращения мельницы и шаровой загрузки, которые являются решающими 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

На обогатительных фабриках применяют барабанные рудоразмольные мельницы; на фабриках окомкования, и для измельчения, например, алунита используют углеразмольные, а для циркония цементные (трубные) шаровые мельницы. Углеразмольная мельница ШБМ-400/800 (Ш-50) оказалась неэффективной, и только вопреки формулам (1) и (2), перераспределив L/D , была принята в эксплуатацию базовая в энергетике ШБМ-370/850 (Ш-50А). Это позволило снизить удельный расход электроэнергии на 9,2%. Отметим, что в модернизированной мельнице не увеличили, как следует из (2), а наоборот – уменьшили диаметр и увеличили длину.

Значительное отклонение измельчаемости руд различных месторождений является главным возмущающим воздействием процесса измельчения, однако измельчение производят в ШМ одних и тех же габаритах. Для компенсации измельчаемости, вопреки формулы (1), известны многочисленные случаи увеличения длины горнорудных ШМ [1], с помощью вставных царг длиной от 600 до 1200 мм, что позволило увеличить производительность на 14...20 т/ч. Горнорудная мельница с центральной разгрузкой МШЦ-5000×10500 [2] приближается к классу трубных, а не барабанных ШМ. Фирма "Rischmann", Германия внедрила трубные, горнорудные мельницы предварительного и окончательного помола габаритами $\varnothing 5,0 \times 15,5$ м, работающие с классификатором $\varnothing 8,5$ м. Мощность установки 12000 кВт. В 1982 г. "Судварангер АС" (Норвегия) [3] внедрила самую большую в мире горнорудную трубную безредукторную ШМ $D = 12$ м, $L = 40$ м с регулируемым электроприводом $N = 35$ МВт.

Приведенные прецеденты с одной стороны подтверждают влияние на процесс измельчения соотношения L/D , с другой стороны свидетельствуют о том, что эффективность измельчения мельниц не согласуется с формулами (1) и (2). Из практики измельчения известно [4], что мельницы большого диаметра, в отличие от мельниц малого диаметра, обеспечивают большую производительность, но грубый помол, и наоборот.

Таким образом, во-первых, решение проблемы соотношения L/D – в компромиссе между достоинствами и недостатками мельниц большого и малого диаметров, оптимально реализуемом в мельницах с плавно-переменной структурой. Во-вторых, следует отметить тенденцию приближения длины L барабанных мельниц к трубным мельницам.

Підготовчі процеси збагачення

Феномен шарових мельниць з жорстко-перемінною структурою (перемінним співвідношенням L/D)

Для аналізу розглянемо трубні мельниці, які за довжиною розділені на три камери двома міжкамерними перегородками та вихідною решіткою з ерліфтом. Складним і не ефективним розділенням мельниць на камери прийнята спроба хоча б частково класифікувати шари за розмірами, забезпечити різний коефіцієнт заповнення мелючих тіл і середневзвешений шар, реалізувати різні швидкісні режими роботи шарів вздовж мельниці. Рекомендований у світовій практиці [4] коефіцієнт заповнення і сортимент шарів у кожній камері різні і, що надзвичайно важливо, їх кількість постійно зменшується на 3% по камерам.

Розглянемо незвичайну трубну ступінчасту мельницю фірми "Мааг", що дробить хроміт і магнезит на Запорізькому огнеупорному заводі. Діаметр першої камери цієї мельниці – 2,3 м, а другої і третьої – 1,8 м. Ступінчаста ШМ – дробильний агрегат з перемінним співвідношенням L/D , що привертає особливу увагу. Роботу шарових мельниць різних конструкцій можна порівнювати між собою тільки при строгому дотриманні початкових умов: дробленні одного і того ж матеріалу, при однакових робочих об'ємах мельниці і завантаженнях шарів. Для порівняння в табл. 2 наведено паспортні дані за дробленням цементу однієї марки промисловими мельницями різної конструкції. На огнеупорному заводі ці мельниці дроблять хроміт і магнезит, що додатково і однозначно гарантує достовірність отриманих результатів. Два порівнювані мельниці мають майже однаковими початковими умовами. Однакове співвідношення продуктивності порівнюваних мельниць при дробленні цементу і хроміт-магнезиту ($21,9 : 12 = 10 : 5,4$), виключає випадковість аналізованих результатів і додатково підтверджує їх достовірність.

Таблиця 2

Параметри	Серійна трубна мельниця розмірами 2,0×10,5 м	Ступінчаста мельниця фірми МААГ 2,3/1,8×11 м
Еквівалентний діаметр, м	2,0	1,96
Робочий об'єм, м ³	28,0	27,5
Шарова завантаження, т	32,0	29,0
Потреблявана потужність, кВт	540,0	365,0
Продуктивність за цементу, т/ч	12,0	21,9
Продуктивність за хроміту і магнезиту, т/ч	5,4	10,0
Удельний витрати електроенергії на 1 т матеріалу, кВт·ч/т	45,0	16,6
Приведена ефективність	1,0	2,71

Ефективність ступінчастої мельниці в 2,71 рази вище ефективності мельниці класическої конструкції, а удельний витрати електроенергії становить 16,6 кВт·ч/т, т.е. на 28,4 кВт·ч/т менше трубної ШМ.

Таким образом, получен фундаментальный результат, неопровержимо подтверждающий эффективность мельниц с переменным соотношением L/D .

Влияние частоты вращения мельницы и коэффициента заполнения шаров на эффективность измельчения

Принципиальные недостатки ШМ с постоянной частотой вращения заключаются в том, что оптимальная высота подъема шаров непрерывно меняется (дрейфует) в зависимости от изменения внутренних возмущений: интенсивно истирающихся шаровой загрузки и профиля футеровки. Изменяющиеся в широком диапазоне внешние возмущения (измельчаемость, крупность и др.) – требуют корректировать высоту подъема шаров в зависимости от характера процесса измельчения, что возможно компенсировать только изменением частоты 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) и (3) вообще отсутствуют. Исследования НПП "КВАР" с регулируемым электроприводом в различных отраслях промышленности позволили повысить производительность ШМ до 50%, с высокой точностью ($\pm 0,5\%$) стабилизировать тонкость помола. Эффективность измельчения при заданных соотношениях L/D существенно зависит от частоты вращения мельницы в строгом соответствии с коэффициентом заполнения мелющих тел [5].

Регулируемый электропривод позволяет:

- осуществить плавный пуск ШМ, обеспечив долговечность работы редуктора;
- выбрать оптимальную траекторию падения шаров с учетом изменяющихся характеристик руды и состояния шаров;
- реализовать оптимальную систему комбинированного управления на основе двух каналов: безынерционного канала управления частотой вращения ШМ и инерционного (корректирующего) канала управления загрузкой руды.

Наиболее полные исследования с регулируемым электроприводом проведены на мельнице размерами 2/10,5 м Белгородского цементного завода [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.

Підготовчі процеси збагачення

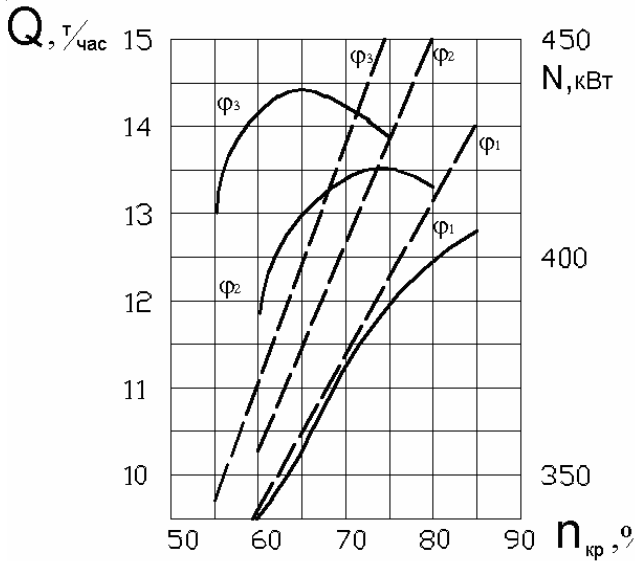


Рис. 1. Зависимость производительности Q и потребляемой мощности N (пунктирные прямые) от коэффициента заполнения шаров ($\varphi_1=0,28$; $\varphi_2=0,32$; $\varphi_3=0,36$) и скорости вращения мельницы n

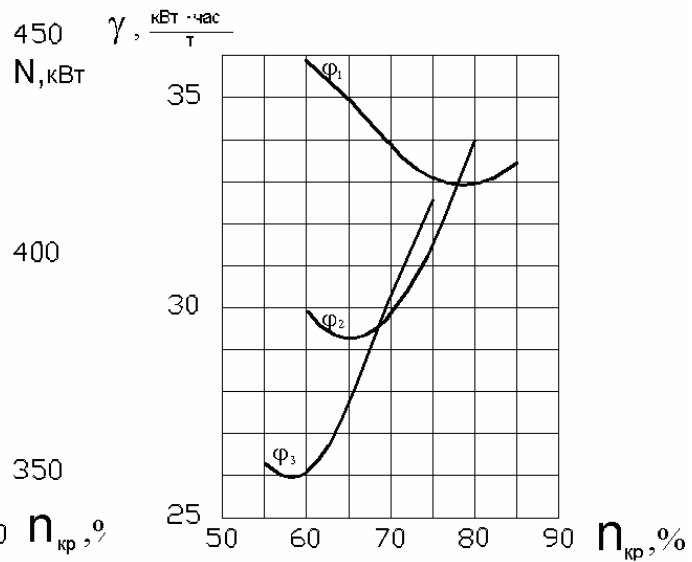


Рис. 2. Зависимость γ удельного расхода электроэнергии от коэффициента заполнения шаров ($\varphi_1=0,28$; $\varphi_2=0,32$; $\varphi_3=0,36$) и скорости вращения мельницы n

Из данных, приведенных на рис. 1 и 2, можно сделать следующие выводы:
 – меньшей частоте вращения мельницы должна соответствовать большая шаровая загрузка;

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

– реализовать этот режим можно только с помощью регулируемого электропривода;

– 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.

Доктор Беке Бела [7] подтвердил совпадение зависимостей (рис.1, 2), сравнив наши результаты, приведенные в работе [5], с результатами итальянских исследований, полученных на заводе "Гидония" в Риме на трех мельницах размерами 4,8/15,4 м, с регулируемым безредукторным электроприводом, мощностью 6 тыс. кВт.

Таким образом, оптимальный режим работы ШМ при заданных значениях соотношения L/D однозначно и существенно зависит от совместного взаимодействия частоты вращения мельницы и коэффициента заполнения шарами.

Универсальная конусная мельниц 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 конусную мельницу (КМ) с регулируемым электроприводом [5-7].

Особенностью конструкция КМ (рис. 3), является уменьшающийся в сторону разгрузки конусный корпус. В отличие от других мельниц, КМ может быть закреплена на общей раме, что позволяет не только устанавливать ее горизонтально, но и наклонять конусный корпус относительно продольной оси в пределах угла наклона между образующей конуса и горизонталью. Наклоном корпуса можно перераспределять заполнение шаров по длине конуса, как в ручном, так и в автоматическом режиме.

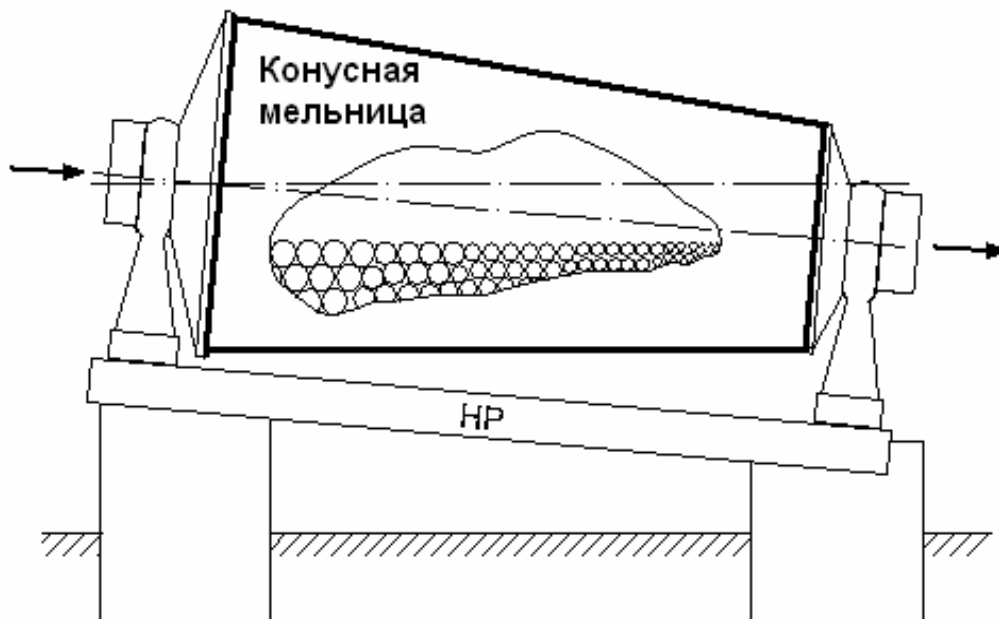


Рис. 3. Универсальная конусная мельница
НР – общая наклонная рама

В КМ впервые в мировой практике сформулирована и 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 КМ, системно объединяющих в одном агрегате в полном объеме весь комплекс прогрессивных технологических и конструкторских решений, позволяющих реализовать:

Збагачення корисних копалин, 2010. – Вип. 43(84)

Підготовчі процеси збагачення

1. Идеально убывающую классификацию коллектива шаров различного диаметра в каждом из поперечных сечений по всей длине конусного корпуса.
2. Плавный переход оптимальных скоростных траекторий падения шаров и их оборачиваемость в зависимости от изменения радиуса конуса.
3. Оптимально убывающий по длине конусного корпуса коэффициент заполнения шаровой загрузки.
4. Саморегулирование сортамента шаров (средневзвешенного шара).
5. Компромисс между достоинствами и недостатками мельниц большого и малого диаметра (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. КМ не критична к профилю и износу бронифутеровки.
8. Устранить неравномерное истирание мелющих тел и снизить износ шаров благодаря их рациональному заполнению и оптимальной работе.
9. Увеличить коэффициент использования рабочего времени агрегата.
10. Уменьшить потребляемую мощность, габариты, металлоемкость, капитальные затраты и ремонтно-эксплуатационных работ.

Приведенные достоинства КМ полностью согласуются с современными представлениями о процессе измельчения. Ступенчатая ШМ с жестко-переменным соотношением L/D является частным решением обобщенной интегрально-многоступенчатой конструкции КМ с плавно-переменной структурой. При увеличении числа ступенек в мельнице "Мааг" ее эффективность возрастет. Интегрирование бесконечно большого количества ступенек в мельнице приведет к конструкции КМ.

Новый механизм классификации шаровой загрузки в КМ начинается в момент отрыва шара и его свободного полета по траектории, создаваемой конусным корпусом. Вектор падения шара в КМ перпендикулярен образующей конуса. 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 происходит сегрегация шаров по размерам.

Разные траектории падения шаров по длине конусного корпуса в сочетании с классификацией шаров оказывают решающее значение на процесс измельчения. Эта задача решается трудоемким и малоэффективным подбором профиля броневой футеровки, которая интенсивно истирается [2]. В ШМ по всей длине реализуется одна и та же траектория падения шаров. В КМ траектории падения шаров жестко зависят от радиуса конусного корпуса и оптимальны в каждом поперечном сечении. Регулировать свободный полет шаров можно только скоростью вращения КМ.

НПП "КВАР" разработал, как прокатную футеровку, так и конструкция бронеплит, устанавливаемых в каждом поясе конусного корпуса путем чередования только трех типоразмеров.

Мировой опыт загрузки шаров рекомендует ступенчатое уменьшение шаров по камерам с постоянным значением $\Delta\phi = 3\%$. В КМ эта идея реализуется

Підготовчі процеси збагачення

автоматически, причем верхний уровень шаров по всей длине конуса выстраивается на одной горизонтали. Это позволяет упростить трудоемкий процесс догрузки шаров. Шар по мере истирания будет постепенно передвигаться вдоль конуса, а его место займет следующий новый шар максимального диаметра.

Сортамент мелющих тел должен обеспечить рациональную мелющую загрузку, которая позволила бы создать большую поверхность контакта с материалом, не допуская свободного прохождения его в промежутках между шарами без измельчения и в то же время обеспечить прохождение измельченных фракций вдоль мельницы. В КМ эта задача решается автоматическим саморегулированием средневзвешенного шара, вне зависимости от того, какой изначально выбран сортамент шаров.

Различный характер процесса измельчения по длине классических ШМ приводит к неравномерному истиранию мелющих тел. В ШМ шары распределяются хаотично, причем шары большого диаметра могут оказаться в конце, а малого в начале мельницы, что приводит к их не эффективной работе и повышенному износу.

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

Таким образом, предлагаются принципиально новые механизм и технология процесса измельчения, на основе которой разработана КМ с регулируемым электроприводом. Универсальная КМ – 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 КМ подтверждена многочисленными патентами.

Список литературы

1. **Черных С.И.** Повышение производительности отделений измельчения на обогатительных фабриках / Серия: Обогащение руд цветных металлов. – М.: Цветметинформация, 1979. – Вып. 2. – С. 15-20.
2. . Измельчение, энергетика и технологии / **Г.Г. Пивняк, Л.А. Вайсберг, В.И. Кириченко и др.** – М.: Руда и металлы, 2007. – 238 с.

Підготовчі процеси збагачення

3. **Meintrup W., Kleiner F.** Worlds Largest ore Grinder Withut Gears. // Mining Eng. – 1982. – № 9. – P. 34.
4. **Дуда В.** Цемент. – М.: Стройиздат, 1981. – 156 с.
5. **Ковалюх М.В.** Углеразмольная трубно-конусная мельница нового поколения // Теплоэнергетика. – 2001. – №1. – С. 45-51.
6. **Kovalyukh S.B., Kovalyukh B.R.** A New Generation Grinding Unit // World Cement. – 2009. – № 10. – P. 28-32.
7. **Ковалюх С.В., Ковалюх В.Р.** Универсальная конусная мельница с регулируемым электроприводом // Горный журнал. – 2010. – № 7. – С. 56-63.
8. **Beke Bela** Phenomena in speed regulated ball mill // Word Cement Technolodgy. – 1979. – №8. – P. 47-52.

© Ковалюх С.В., Ковалюх В.Р., 2010

*Надійшла до редколегії 12.08.2010 р.
Рекомендовано до публікації к.т.н. В.В. Гаєвим*