

Підготовчі процеси збагачення

"Ки евск ая"	1994	3	Ж	1688,6	26,0	71,6	7,2	71,6	7,2	27,9	74,2
	2003	4	Ж	4000,2	32,3	64,5	9,1	64,5	9,1	35,0	75,1
"Дз ерж инс кая"	1994	2	Ж	1713,4	29,8	59,9	7,7	64,5	10,0	34,6	66,9
	2003	3	Г, Ж, К	1693,1	36,2	57,7	11,4	60,2	12,6	38,8	72,9

Таким образом, увеличение количества машинных классов при обогащении рядовых углей на обогатительных фабриках является в настоящее время одним из основных направлений снижения зольности коксового концентрата.

Список литературы

1. Техничко-економический анализ работы углеобогатительных фабрик Украины за 1994 г. – Луганск: УкрНИИуглеобогащение. – 1995. – 166 с.
2. Техничко-економический анализ работы углеобогатительных фабрик Украины за 2003 год. – Луганск: УкрНИИуглеобогащение. – 2004. – 95 с.
3. **Полулях А.Д.** Обогащение рядового угля пятью машинными классами // Уголь Украины. – 1999. – № 5. – С. 49–50.
4. **Полулях А.Д., Курченко И.П., Милай А.А.** Об экономической эффективности обогащения рядовых углей пятью машинными классами // Збагачення корисних копалин. – 2000. – №10(51). – С. 7–12.

© Полулях А.Д., Ищенко О.В., 2005

*Надійшла до редколегії 15.04.2005 р.
Рекомендовано до публікації*

УДК 622.73

А.Д. ПОЛУЛЯХ, д-т. техн. наук,
Ю.И. БУЛАВА, канд. техн. наук,
Л.Г. ШЕВЧЕНКО,
Г.Е. ГУРТОВАЯ

(Украина, Днепропетровск, Предднепровская лаборатория "УкрНИИуглеобогащение")

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗАГРУЗКИ ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ НА ИХ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

53

Збагачення корисних копалин, 2005. – Вип. 23(64)

Для достижения наибольшей скорости измельчения гранулометрический состав загрузки шаровых мельниц в целом должен подчиняться тем же закономерностям, что и загрузка бесшаровых мельниц. При этом часть загрузки составляют шары. Загрузка шаровых мельниц в целом должна обладать наименьшей порозностью, тогда производительность мельниц будет наибольшей. Во исполнение этого принципа объем измельчаемого материала должен быть равен объему межшаровых пустот в шаровой загрузке. В этом случае измельчаемый материал помещается в объеме шаровой загрузки и наиболее эффективно измельчается в контактах шаров. Влияние гранулометрического параметра [1] исходной загрузки мельниц на скорость измельчения иллюстрируется данными, приведенными на рис. 1.

Измельчению подвергался кварц крупностью 40–0; 20–0; 10–0; 5–0; 2,5–0; 1,5–0 мм одинаковой во всех случаях одноразмерной шаровой загрузкой [2].

Гранулометрический параметр исходной загрузки мельниц определялся как $P_o = D_{ш}/d_{cp}$, например для руды 40–0 мм $P_o = D_{ш}/20 = 0,05D_{ш}$.

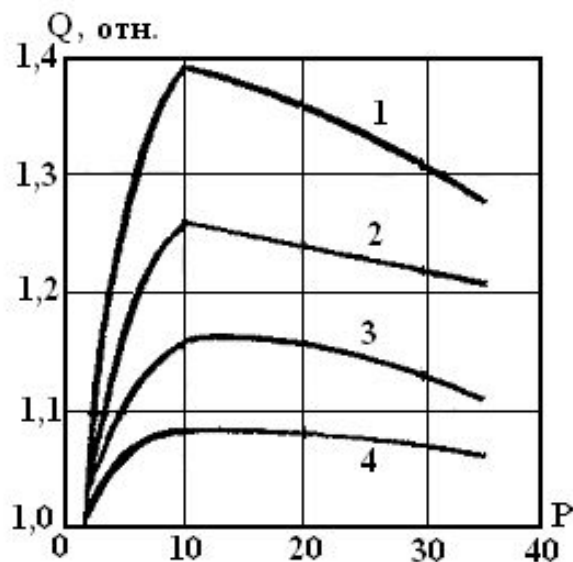


Рис. 1. Залежність продуктивності шарової мельниці від гранулометричного параметра завантаження

Как показывают данные рис. 1 с увеличением гранулометрического параметра производительность мельницы по готовому продукту во всех случаях возрастает до определенного оптимального значения гранулометрического параметра. При дальнейшем увеличении гранулометрического параметра загрузки производительность мельницы снижается. Это связано с тем, что при дальнейшем увеличении гранулометрического параметра соотношение размеров шаров и частиц руды становится таковым, когда размер пор в шаровой загрузке и размер частиц

руды становятся соизмеримыми. Это приводит к снижению числа соударений шар-частица, вследствие того, что частицы могут "прятаться" в порах шаровой загрузки. Поэтому значение оптимального гранулометрического параметра в общем случае будет зависеть от соотношения диаметра пор в измельчающей среде и размера частиц измельчаемого материала.

Данные рис. 1 показывают, что оптимальное значение гранулометрического параметра равняется 10 (диаметр применяемых шаров равен 26 мм). Данное число определяется также геометрическим соотношением размеров зерен скелета и заполнителя.

Для подтверждения вышеизложенных соображений рассмотрим теоретическую зависимость диаметра пор шаровой загрузки от диаметра шаров.

Исходя из геометрических соображений установлено [3], что диаметр пор может быть определен как

$$d_{\Pi} = \sqrt{32K},$$

где K – проницаемость шаровой среды.

Теоретическая проницаемость для шаровых укладок по Слихтеру [4] равна

$$K = \frac{n^2 D^2}{96(1-m)},$$

где D – диаметр шара; m – порозность укладки.

Величина n зависит от типа укладки и определяется из выражения

$$n = 1 - \frac{\pi}{4 \sin \alpha}.$$

Угол α изменяется от 60° (для октаэдрической) до 90° (для кубической укладки), соответственно порозность изменяется от 0,26 до 0,476.

Определим отношение D/d_{Π} для крайних значений шаровых укладок.

В первом случае:

$$d_{\Pi} = \sqrt{32K} = \sqrt{32 \frac{n_1^2 D^2}{96(1-0,476)}} = 0,796 n_1 D;$$

$$n_1 = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot \sin 90^\circ} = 0,215;$$

$$D / d_{\Pi} = \frac{1}{0,796 \cdot 0,215} = 5,84.$$

Во втором случае:

$$d_{\Pi} = \sqrt{32K} = \sqrt{32 \frac{n_2^2 D^2}{96(1-0,26)}} = 0,676n_2, D;$$

$$n_2 = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot \sin 60^\circ} = 0,094;$$

$$D / d_{\Pi} = \frac{1}{0,67 \cdot 0,094} = 15,9.$$

Так как реальная шаровая загрузка укладывается в некоторых средних значениях, то оптимальное отношение в среднем составит

$$D / d_{\Pi} = \frac{5,84 + 15,9}{2} = 10,9,$$

т.е. оно близко совпадает со значением, определенным экспериментально. Поэтому данное значение гранулометрического параметра является оптимальным и постоянным для измельчения материалов одноразмерной шаровой загрузкой. При этом эквивалентный диаметр пор между шарами определяется как

$$d_{\Pi} = c \cdot D_{ш}, \quad (1)$$

где $D_{ш}$ – средний диаметр шаров; c – коэффициент.

Отношение среднего диаметра пор между шарами к среднему диаметру частиц измельченного материала при $P_{\text{опт}} = 10$ так же величина постоянная и равна

$$d_{\Pi} / d_{cp} = \frac{cD_{ш}}{d_{cp}} = 10c. \quad (2)$$

Однако, известно, что одноразмерная шаровая загрузка не является наилучшей. Кроме того, при работе мельниц шаровая загрузка не остается одноразмерной в результате ее износа. В то же время варьирование ситовым составом шаровой загрузки дает возможность изменять средний диаметр пор между шарами, что в свою очередь дает возможность подбирать шаровую загрузку для измельчения материала и получения готового продукта различной крупности с наибольшей производительностью.

Диаметр пор в такой шаровой загрузке определяется по формуле

$$d_{\Pi} = cD_{ш} / P_{ш}^{0.5}, \quad (3)$$

где $P_{ш}$ – гранулометрический параметр шаровой загрузки.

Порозность и гранулометрический параметр шаровой загрузки определяются по тем же формулам, что и любой зернистой среды. При этом, для получения максимальной скорости измельчения отношение среднего диаметра пор между шарами к среднему диаметру частиц измельчаемого материала должно оставаться равным 10 с., тогда

$$d_{\Pi} / d_{cp} = \frac{c \cdot D_{ш}}{d_{cp} \cdot P_{ш}^{0.5}} = 10c$$

или

$$P_{опт} = D_{ш} / d_{cp} = 10P_{ш}^{0.5}. \quad (4)$$

Оптимальный гранулометрический параметр загрузки мельницы тем больше, чем выше гранулометрический параметр шаровой загрузки (рис. 2). Для одномерной шаровой загрузки $P_{ш} = 1$ и $P_{опт} = 10$.

Из выражения (4) следует, что чем плотнее (разноразмерная) шаровая загрузка (чем меньше ее порозность), тем больше должно быть отношение среднего диаметра шаров к среднему диаметру частиц измельчаемого материала, тем выше будет производительность мельницы.

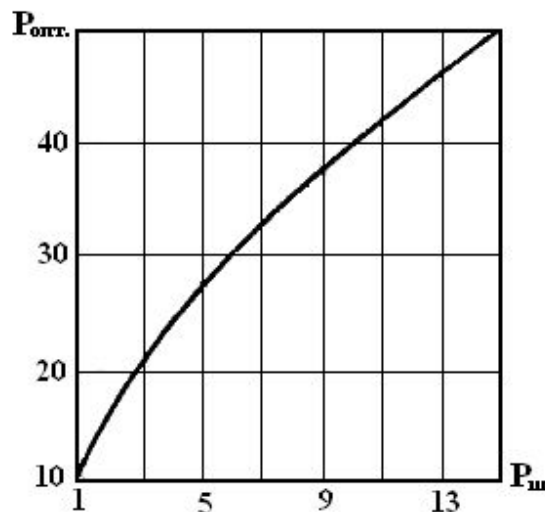


Рис. 2. Зависимость оптимального гранулометрического параметра загрузки мельницы от гранулометрического параметра измельчающей среды

Вопрос о наиболее выгодном ассортименте шаровой загрузки имеет две стороны. Диаметр и, следовательно, вес шаров должен быть достаточен для дробления максимальных частиц материала, а во-вторых, шаровая загрузка должна иметь такой ассортимент межшаровых пор, который бы обеспечивал заданную крупность помола.

Измельчение материала в шаровых мельницах осуществляется в точках контакта между шарами ударами последних, а также истиранием в их массе. когда они перемещаются относительно друг друга. Считается, что при обычных скоростях вращения мельниц на долю истирания приходится лишь несколько процентов от общей работы измельчения [5]. Так, что первый вид измельчения материала в мельницах преобладает.

Естественно, что в числе прочих факторов скорость измельчения материала прямо пропорциональна числу точек контактов между мелющими телами в единицу времени. Число точек контактов между мелющими телами в одноразмерной измельчающей среде было найдено нами из чисто геометрических соображений при условии, что мелющие тела укладываются в кубической укладке. Число контактов между одноразмерными шарами обратно пропорционально кубу диаметра этих шаров.

Увеличение числа контактов между шарами и снижение размера межшаровых пор требуют при одноразмерной шаровой загрузке снижения диаметра шаров. Снижение же диаметра шаров по условиям размолла ниже определенного предела невозможно.

При размолле одноразмерными шарами может наступить момент, когда частицы измельчающегося материала при достижении ими определенного размера, соответствующего размерам порового пространства между мелющими телами одноразмерной измельчающей среды, начинают «прятаться» в этом пространстве, после чего эффективность измельчения должна резко снизиться. Это представление о механизме измельчения в шаровых мельницах соответствует действительности. В своей монографии С.Е. Андреев, В.В. Товаров,

В.А. Перов отмечают, что в шаровых мельницах отдельные частицы размалываемого материала могут в течение более или менее длительного времени находиться в ней, не попадая под удары мелющих тел и не подвергаясь измельчению [6].

Можно себе представить, что при некотором достаточно большом диаметре мелющих тел одноразмерной измельчающей среды нельзя практически получить достаточно высокую степень помола материала. Отсюда становится понятной необходимость подбора размера мелющих тел не только по первоначальной крупности измельчаемого материала [7], но и по

необхідною тинине измельчення кінцевого продукту [8, 9].

Ети два справедливіх вимоги містять протиріччя в тому, що для розмола первоначальних кусків измельчаемого матеріала вимагається измельчаюча середа з достатньо великими діаметрами мелючих тіл, а для отримання відповідної тинини кінцевого продукту, при достатньо високій ефективності измельчення, вимагається измельчаюча середа з достатньо малими діаметрами мелючих тіл, так як при цьому збільшується число контактів і зменшуються розміри пор між мелючими тілами. Етим вимогам відповідає измельчаюча середа, складаюча з мелючих тіл різного діаметра. При цьому виникає питання, в якому оптимальному співвідношенні повинні знаходитися мелючі тіла різних діаметрів з тим, щоб підвищити ефективність процесу измельчення.

К.А. Разумов на основанні гіпотези Бонда об износе шарів і Б.Н. Дубровин на основанні гіпотези о відповідності ситової характеристики шарів ситової характеристикі вихідної руди дали розрахунок так званої раціональної завантажки шарів в мельницю.

Так як продуктивність мельниць змінюється приблизно прямо пропорційно щільності дробящої завантажки [6], то дробяща завантажка повинна мати, можливо, великим гранулометричним параметром – $P_{ш}$ (меншою порозністю).

Збільшення $P_{ш}$ измельчаючої середи означає збільшення числа точок контактів в одиниці об'єму і, відповідно, збільшення ефективності измельчення при всіх інших рівних умовах. Чем щільніше измельчаюча середа, тем менше розмір міжшарових пор і тем менше загальний об'єм міжшарових порожот. Ето обуславлює менший загальний об'єм "прихованих" частинок в порожоті і менший їх розмір і, відповідно, великий об'єм частинок матеріала, піддаваний измельченню за один цикл измельчення.

Відомо, що при розрахунок діаметра шарів в мельницю останній зв'язаний з фізичною характеристикою измельчаемого матеріала, так і з режимом роботи (швидкість обертання) і конструкцією мельниць (діаметр барабана) [10]. Основним недоліком цих залежностей, по нашому мненню, є відсутність урахування оптимального співвідношення діаметрів шарів і зерен измельчаемого матеріала.

Ясно, що при будь-якому режимі роботи мельниць продуктивність буде найбільшою тільки при дотриманні цього співвідношення. Необхідно відзначити також, що при використанні сталевих шарів виконання основного вимоги – оптимальний гранулометричний параметр завантажки, автоматично задовольняє і друге вимоги, складаюче в тому, що діаметр шара повинен бути достатнім для руйнування даного матеріала.

Поэтому предлагаемая ниже методика расчета загрузки шаровых мельниц включает определение ситового состава шаров при сохранении оптимального

гранулометричного параметра загрузки.

Методика расчета шаровой загрузки состоит в следующем. Зная, средний диаметр частиц измельчаемого материала и задаваясь гранулометрическим параметром шаров, определяется средний диаметр шаров. Например, $d_{cp} = 6$ мм (0–12 мм) и $P_u = 2,0$. Тогда $D_u = 10 \cdot d_{cp} \cdot P_u^{0,5} = 10 \cdot 6 \cdot 2^{0,5} = 85$ мм. Принимаем шаровую загрузку, состоящую из четырех сортов шаров различного диаметра. Выход шаров в загрузке от крупного к мелкому по принципу наименьшей порозности должен составлять 34, 15, 21, 30%, соответственно. Определяется диаметр шаров каждого сорта. Средний диаметр шаров, составляющих заполнитель, может быть определен по следующей формуле:

$$D_u = 0,7d_{cp} + 0,3d_3.$$

Разделим каждый член данного уравнения на d_3

$$\frac{D_u}{d_3} = 0,7P_u + 0,3,$$

тогда $d_3 = D_u / (0,7 \cdot P_u + 0,3) = 85 / (0,7 \cdot 2 + 0,3) = 50$ мм.

Средний диаметр шаров составляющих скелет будет равен

$$d_{cp} = \frac{D_u - 0,3d_3}{0,7} = \frac{85 - 0,3 \cdot 50}{0,7} = 100 \text{ мм.}$$

Скелет шаровой загрузки состоит из шаров трех сортов, т.е.

$$\frac{34 \cdot D_1 + 15 \cdot D_2 + 21 \cdot D_3}{70} = 100.$$

Примем, что $D_1 = 120$ мм; $D_2 = 100$ мм, тогда $D_3 = 70$ мм. Порозность шаровой загрузки составит

$$m_u = H / p^{0,14} = 0,4 / 2^{0,14} = 0,364.$$

Таким образом, мы получаем шаровую загрузку следующей характеристики.

Таблиця

Диаметр шаров, мм	120	100	70	50	$D_{ш} = 85$ мм $P_{ш} = 2$
Выход, %	34	15	21	30	$m_{ш} = 0,364$

В соответствии с данной характеристикой рассчитывается объем шаров и рудной загрузки:

$$1. \text{ Объем шаровой загрузки } V_{ш} = \frac{a \cdot V_{м}}{100}, \text{ м}^3,$$

где a – степень заполнения мельницы шарами, %; $V_{м}$ – объем мельницы, м^3 .

$$2. \text{ Вес шаровой загрузки } G_{ш} = \frac{a \cdot V_{м}}{100} \delta_{ш} (1 - m_{ш}), \text{ т},$$

где $\delta_{ш}$ – плотность шаров, т/м^3 ; $m_{ш}$ – порозность шаровой загрузки.

3. Вес рудной загрузки (масса руды, находящейся в мельнице при ее работе)

$$G_{р} = m_{ш} \frac{a \cdot V_{м}}{100} \gamma_{р}, \text{ т},$$

где $\gamma_{р}$ – насыпная плотность руды, т/м^3 .

4. Отношение объема шаровой загрузки к объему рудной загрузки

$$\frac{V_{ш}}{V_{р}} = \frac{a V_{м}}{100} \cdot \frac{a V_{м} \cdot m_{ш}}{100} = 1 / m_{ш}$$

5. Отношение веса шаровой загрузки к весу рудной загрузки

$$\frac{G_{ш}}{G_{р}} = \frac{\delta_{ш} (1 - m_{ш})}{m_{ш} \cdot \gamma_{р}}$$

Поддержание оптимальных ситового состава шаровой загрузки и гранулометрического параметра $P_{опт}$ при работе шаровых мельниц возможно тремя путями:

1) соответствующей добавкой шаров, однако при этом необходимо знать закон износа шаров в мельнице;

2) при установившейся работе мельницы и при принятой регулярной добавке шаров, определить ситовый состав шаров в мельнице. Соответственно ситовому составу шаров загружать в мельницу измельченный материал необходимого ситового состава;

3) в мельницю загружається шаровая загрузка оптимального ситового состава по отношению к измельчаемому материалу. По мере износа шаровой загрузки и снижения производительности мельницы, шаровая загрузка полностью заменяется новой, а старая сортируется и используется для составления новой загрузки.

Список литературы

1. **Клешнин А.А.** Исследование процесса фильтрования угольных шламов различного гранулометрического состава. Дис... канд. техн. наук. – Донецк, ДПИ. – 148 с.
2. **Перов В.А., Бранд В.Ю.** Измельчение руд. – М.: Metallurgizdat. – 1950. – 220 с.
3. **Вахромеев И.И.** Некоторые вопросы геометрии фильтрации // Горный журнал. – Изд. ВУЗов. – 1960. – №11.
4. **Боришанский В.М.** Сопротивление при движении воздуха через слой шаров / Сб. Вопросы аэродинамики и теплопередачи в котельно-топливном процессе. – М.: Госэнергоиздат. – 1958. – С.232–238.
5. **Левинсон Л.Б., Прейгерзон Г.И.** Дробление и грохочение полезных ископаемых. – М.: Гостоптехиздат. – 1940. – 772 с.
6. **Андреев С.Е., Товаров В.В., Перов В.А.** Закономерности измельчения и исчисления характеристики гранулометрического состава. – М.: Metallurgizdat. – 1959. – 437 с.
7. **Разумов К.А.** Рационированное питание мельниц шарами // Горный журнал. – 1947. – №3. – С. 31–36.
8. **Олевский В.А.** Найвыгоднейший размер шаров для шаровых мельниц // Горный журнал. – 1948. – № 1. – С. 30–34.
9. **Дубровин Б.Н.** К вопросу о выборе дробящих тел для шаровой мельницы // Цветные металлы. – 1948. – №1. – С.10–24.
10. **Сиденко П.М.** Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия. – 1968. – 377 с.

© Полулях А.Д., Булава Ю.И., Шевченко Л.Г., Гуртовая Г.Е., 2005

*Надійшла до редколегії 15.04.2005 р.
Рекомендовано до публікації*

УДК 622.7

А.М. БЕРЛИН, канд. техн. наук
В.Ф. ЧУМАК
С.Н. ХОДОС

РАЗДЕЛЕНИЕ ТРУДНОГРОХОТИМЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПО КРУПНОСТИ СУХИМ СПОСОБОМ

Многие отрасли промышленности, перерабатывающие полезные