

## ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ УДАРНО-ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МЕЛЬНИЦ

© А.Э.Левданский

Белорусский государственный технологический университет, Минск

Поступило в Редакцию 3 декабря 2003 г.

*Рассмотрены основные пути снижения энергозатрат при измельчении материалов, предложена их практическая реализация во вновь разработанных конструкциях ударно-центробежных мельниц с проточной классификацией. Приведены результаты экспериментальных исследований и внедрений разработанных конструкций.*

Процесс тонкого измельчения материалов широко используется не только в химической промышленности, но и в большом количестве других отраслей производственной деятельности и в то же время является весьма энергоемким. Поэтому поиску путей снижения энергозатрат при помоле уделяется большое внимание. Для снижения энергозатрат многие специалисты в области процессов измельчения предлагают [1–3]: а) осуществлять измельчение материалов в основном за счет ударного нагружения; б) не допускать накопления измельченного материала в рабочей камере помола, для чего необходимо организовать непрерывное его удаление из этой зоны; в) на пути удаления продуктов измельчения из зоны помола осуществлять классификацию с целью выделения крупной фракции и возврата ее снова в мельницу на домол.

Выполнить все эти требования наиболее реально в ударно-центробежных мельницах с проточной классификацией. Три конструкции ударно-центробежных мельниц, нашедших наиболее широкое применение в производстве, представлены на рис. 1, а–в [4–6].

Все три мельницы состоят из вертикального цилиндрического корпуса 1 с плоским днищем 2 и съемной крышки 3. Внутри корпуса 1 вращается рабочий диск 4 с лопатками 5. В первых двух вариантах мельниц (рис. 1, а, б) диск насажен непосредственно на вал электродвигателя 6, а в третьей конструкции по центру корпуса 1 проходит вал 7 на котором последовательно установлены два диска 4 с лопатками 5, привод их от электродвигателя 6 осуществляется через клиноременную передачу 8.

Во всех трех мельницах на небольшом расстоянии от наружных кромок лопаток 5 по кольцу установлены отражательные стержни 9. Измельчение материа-

ла во всех конструкциях осуществляется путем ударного нагружения материала. Для этого исходный материал через патрубок 10 подается в центр мельницы, где он воздушным потоком транспортируется к лопаткам 5 и далее, двигаясь по ним, разгоняется до высоких скоростей. Затем частицы материала срываются с лопаток 5, ударяются об отражательные стержни 9, и за счет удара происходит их измельчение. Следует отметить, что у всех мельниц движение сплошной среды организуется аналогично центробежным вентиляторам, что позволяет использовать движение воздушного потока для транспортировки материала.

Различие в конструкциях заключается в следующем. В первом варианте конструкции (рис. 1, а) отражательные стержни 9 имеют прямоугольное сечение и установлены с определенным зазором между ними. После удара материала о стержни измельченные частицы за счет центробежной силы и воздействия воздушного потока проходят через щели и далее, двигаясь совместно с воздухом в зазоре между стержнями и корпусом мельницы через тангенциальный разгрузочный патрубок 11, поступают в циклон и фильтр на разделение. За счет вихревого движения воздуха в камере и косоугольного удара материала о стержни измельченные частицы подходят к щелям под углом. Следовательно, через щели между стержнями могут проходить частицы, размер которых значительно меньше размера щелей, что исключает их закупоривание. Расчеты и экспериментальные исследования показывают, что через зазор проходят частицы, размер которых в 2–3 раза меньше ширины щелей. Подбирая необходимую скорость вращения диска с лопатками и устанавливая стержни с определенной шириной, зазора можно достигать требуемой тонины помола материала.

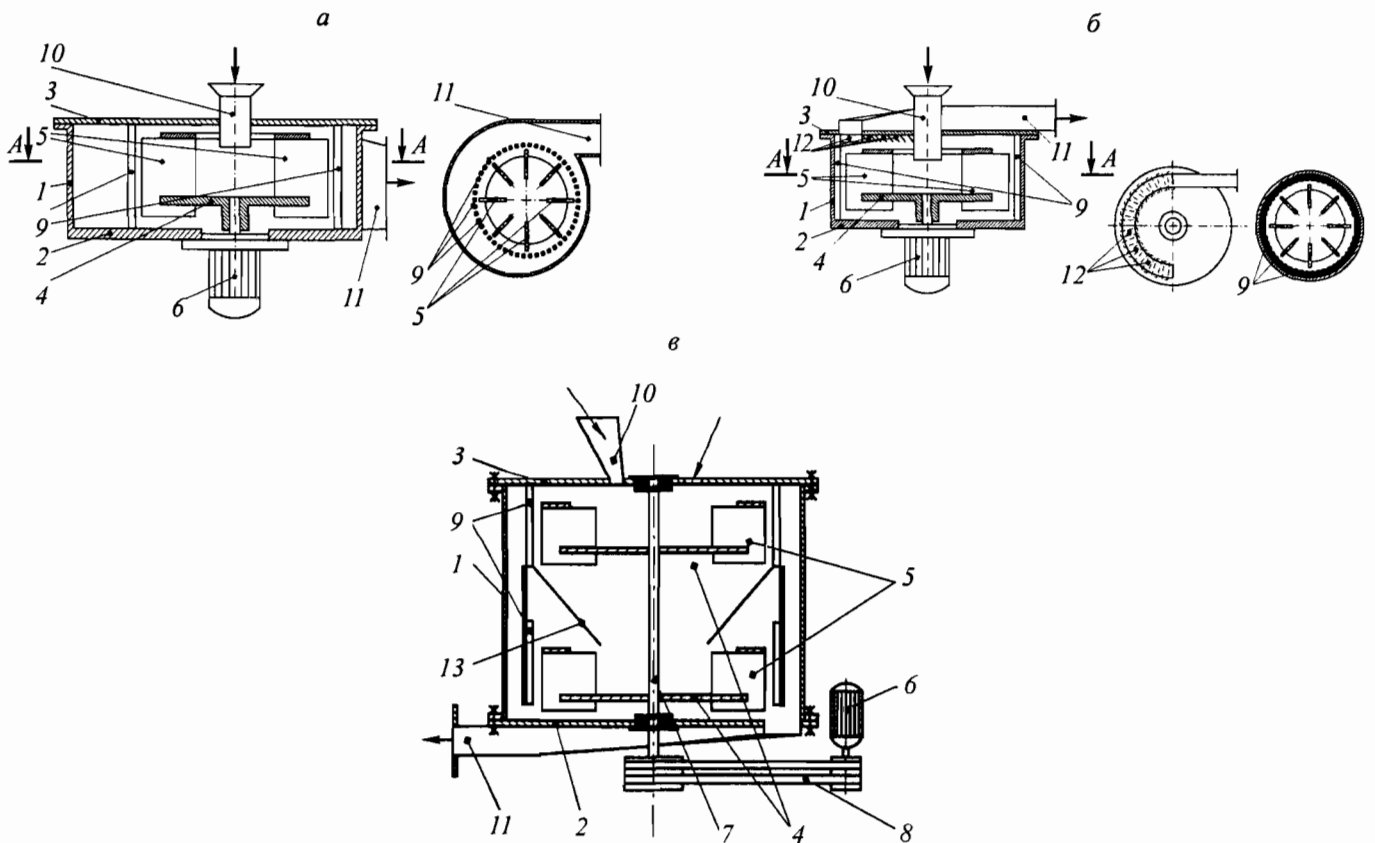


Рис. 1. Схемы ударно-центробежных мельниц.

Конструкция: а) с тангенциальной выгрузкой, б) с верхней выгрузкой, в) двухступенчатая с нижней выгрузкой измельченного материала.

13 – конус, остальные обозначения – в тексте.

Во второй конструкции мельницы (рис. 1, б) отражательные стержни в сечении являются круглыми и установлены вплотную друг к другу. Здесь продукты помола из рабочей зоны подхватываются восходящим воздушным потоком и через кольцевое окно крышки проходят в спиралеобразный канал, далее через разгрузочный патрубок 11 поступают в циклон и фильтр на разделение. Перед кольцевым окном крышки установлены наклонно по ходу вращения ротора отбойные пластины 12, образующие проточный классификатор. Восходящий из зоны помола поток газа и твердых частиц, проходя в зазоре между пластинами классификатора, совершает зигзагообразное движение. При этом более крупные частицы, имеющие большую инерционность, ударяются о наклонные пластины, отскакивают от них и падают вниз на лопатки, где снова подвергаются измельчению. Мелкие частицы, имеющие более низкую инерционность, проходят вместе с воздухом через зазоры и выводятся из мельницы. В данной конструкции мельницы измельчаемый материал может подвергаться многократному удару, а следовательно, она может быть использована для измельчения более твердых веществ.

Третья конструкция мельницы (рис. 1, в) является двухступенчатой, на общем валу установлены два диска с лопатками. Начальное измельчение материала происходит на первой ступени мельницы, а окончательный домол недоизмельченных крупных частиц – на второй. Конструктивно первая ступень соответствует рассмотренной конструкции мельницы первого варианта (рис. 1, а), а вторая – второго (рис. 1, б). В этой конструкции мельницы материал не задерживается в зоне помола, а последовательно проходит обе ступени и через кольцевое окно в днище и тангенциальный патрубок удаляется в циклон. Мельница может успешно работать при измельчении материалов средней прочности.

Основными критериями эффективности помола для любой конструкции измельчителя являются удельная энергоемкость и качество получаемого продукта. Для оценки энергоемкости наиболее часто используют отношение расходуемой энергии к количеству измельчаемого материала ( $\text{кВт} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{т}^{-1}$ ). Наиболее полным показателем качества получаемого продукта является его гранулометрический (фракционный) состав (распределение частиц по размерам).

На энергоемкость и качество помола оказывают влияние как параметры самого процесса измельчения, так и характеристики измельчаемого материала. Параметрами процесса ударного измельчения являются скорость и число ударов, угол удара, удельная нагрузка по материалу, геометрические размеры узлов и деталей мельницы. К характеристикам измельчаемого материала следует отнести его геометрические размеры, физико-механические параметры (твердость, модуль упругости, предел прочности), влажность. Учесть влияние всех параметров процесса измельчения и характеристик исходного материала при составлении теоретической модели разрушения материала ударом практически нереально, поэтому эффективность процесса измельчения в мельницах разработанных конструкций определяли экспериментально. Вначале изучали степень ударного измельчения материала при однократном его прохождении через мельницу. Исследования проводили с использованием конструкции мельницы (рис. 1, б), в которой отражательные стержни 9 как круглого, так и прямоугольного сечения установлены вплотную друг к другу (без зазора). С целью исключения повторного измельчения материала вывод измельченного материала осуществляли не через крышку, а через кольцевое окно и тангенциальный патрубок в днище, аналогично тому как сделано в конструкции мельницы рис. 1, в. Исследования проводили на мельнице с диаметром ротора по концам лопаток 400 мм при изменении скорости вращения от 750 до 2900 об $\times$ мин $^{-1}$ .

Результаты однократного ударного измельчения материалов представлены на рис. 2-4 в виде функции распределения, где по оси абсцисс отложен размер

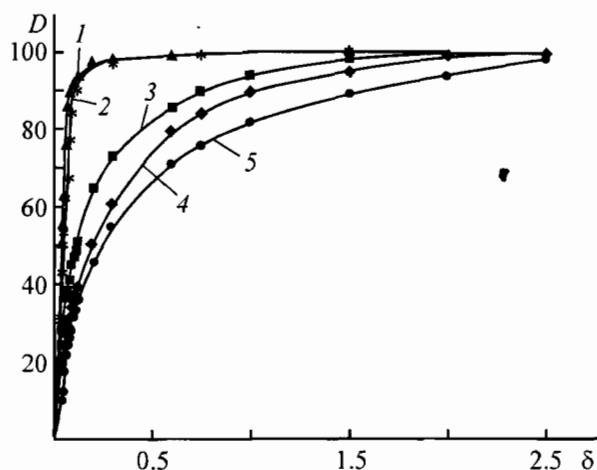


Рис. 2. Фракционный состав продуктов ударного измельчения различных материалов.

$D$  — отношение массы частиц (размер менее  $\delta$ ) к общей массе (%).  $\delta$  — размер частицы (мм); то же для рис. 3-5. Измельчаемое вещество: 1 — известь (гранулы 4-8 мм), 2 — мел (частицы 4-8 мм), 3 — гипсовый камень, 4 — силвинит (частицы 3-10 мм), 5 — зерно (ячмень).

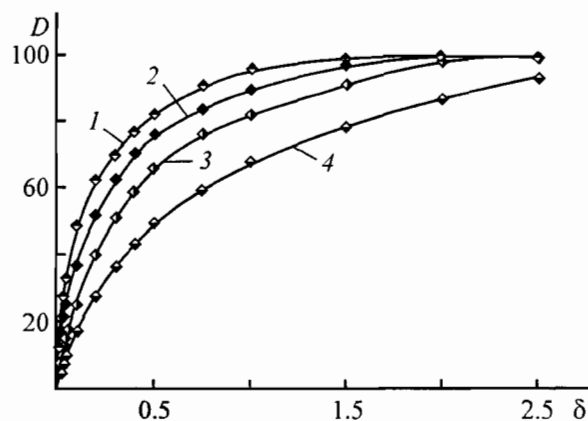


Рис. 3. Фракционный состав продуктов ударного измельчения силвинита при различной производительности  $G$ .  $G$  (кг $\cdot$ с $^{-1}$ ): 1 — 0.061 (220 кг $\cdot$ ч $^{-1}$ ), 2 — 0.133 (480 кг $\cdot$ ч $^{-1}$ ), 3 — 0.211 (760 кг $\cdot$ ч $^{-1}$ ), 4 — 0.333 (1200 кг $\cdot$ ч $^{-1}$ ).

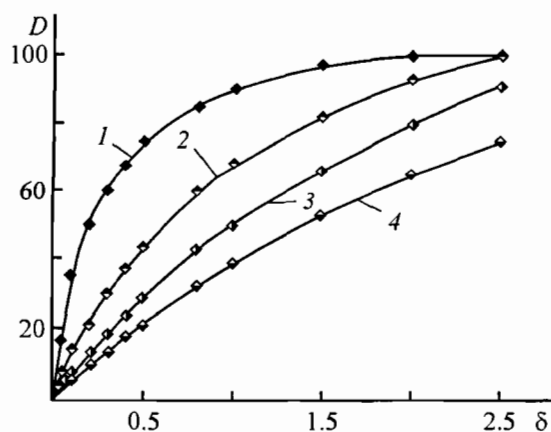


Рис. 4. Фракционный состав продуктов помола силвинита при различных оборотах ротора  $n$  и скорости подачи вещества  $w$ .

$w$  (м $\cdot$ с $^{-1}$ ): 1 — 62.8, 2 — 33, 3 — 21, 4 — 16.  
 $n$  (об $\cdot$ мин $^{-1}$ ): 1 — 3000, 2 — 1500, 3 — 1000, 4 — 7500.

частицы  $\delta$ , а по оси ординат значение  $D$  (%), равное отношению массы частиц, диаметр которых меньше  $\delta$ , к общей массе продукта помола. Кривые фракционного распределения продуктов ударного распределения (рис. 2) получены при скорости вращения ротора 2900 об $\cdot$ мин $^{-1}$  для различных материалов (известь, мел, гипсовый камень, силвинит, зерно ячменя). Во всех опытах скорость поступления вещества составляла 460-520 кг $\cdot$ ч $^{-1}$ , размер исходных частиц — 4-8 мм. Видно, что при ударном одноразовом нагружении наиболее тонко измельчаются гранулы извести и частички мела. Как показывает анализ продуктов помола под микроскопом, они практически рассыпаются до мелких кристаллов. Значительно хуже разрушается зерно и прежде всего его эластичная оболочка.

На рис. 3 представлен фракционный состав продук-

тов помола сильвинита при изменении нагрузки по исходному материалу от 0.061 до 0.333 кг·с<sup>-1</sup> (220–1200 кг·ч<sup>-1</sup>), а на рис. 4 – фракционный состав продуктов его помола при различных оборотах ротора.

Математическая обработка экспериментальных данных с использованием формулы Розина–Рамлера позволила получить зависимость для описания фракционного состава продуктов при одноразовом ударном измельчении материалов в ударно-центробежных мельницах (рис. 1, а–в)

$$D = 100 \{1 - \exp[-0.68(\delta/\delta_{50})^{0.75}]\}, \quad (1)$$

где  $D$  – масса частиц меньше размера  $\delta$ , отнесенная к общей массе частиц (%);  $\delta$  – размер частиц материала (м);  $\delta_{50}$  – размер, при котором масса частиц мельче его составляет 50%.

Для определения размера частиц  $\delta_{50}$  получена эмпирическая зависимость, учитывающая характеристики измельчаемого материала, нагрузку на мельницу по измельчаемому материалу, а также окружную скорость ротора по концам лопаток:

$$\delta_{50} = 2.71c\omega^{-1.42}G, \quad (2)$$

где  $c$  – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства материала и размер исходных его частиц, для известки и мела  $c=0.05$ , для гипсового камня – 0.12, для сильвинита – 0.2, для зерна – 0.25;  $\omega$  – окружная скорость ротора по концам лопаток (м·с<sup>-1</sup>);  $G$  – количество подаваемого в мельницу материала (кг·с<sup>-1</sup>).

Анализ самых крупных частиц в продуктах помола показывает, что размер их даже при измельчении зерна и гипсового камня в 2.5–3 раза меньше исходного материала. При использовании в опытах отражательных стержней круглого или прямоугольного сечения заметного влияния на фракционный состав продуктов помола не обнаружено. Исследование процесса измельчения с одновременной классификацией проводили с использованием конструкции мельницы, представленной на рис. 1, а. Здесь отражательные стержни имели квадратное сечение (14×14 мм), а расстояние между ними изменяли от 0.5 до 4 мм. Исследования проводили сначала при измельчении сильвинита, а потом и других материалов при скорости вращения ротора 2300 и 1450 об·мин<sup>-1</sup> и нагрузке по материалу 0.133 кг·с<sup>-1</sup>. В процессе опытов постоянно определяли фракционный состав продуктов помола, прошедших через щели между стержнями. Проведенные опыты, результаты которых представлены на рис. 5, показали, что основным критерием, определяющим фракционный состав продуктов помола, является размер щелей между стержнями.

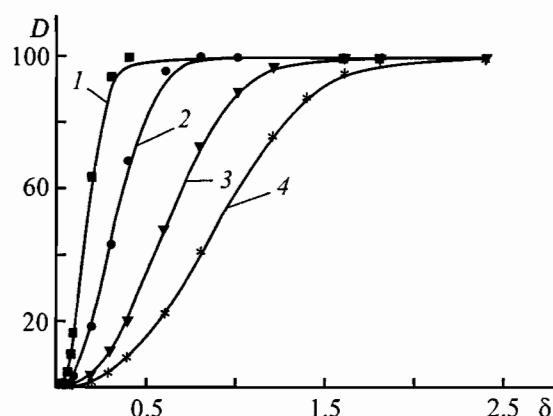


Рис. 5. Фракционный состав продуктов помола сильвинита в мельнице (рис. 1, а) при различных размерах щелей  $b$ .

$b$  (мм): 1 – 0.5, 2 – 1, 3 – 2, 4 – 3.

Максимальный размер частиц, прошедших через щели, во всех опытах и с различными материалами составляет

$$\delta_{\max} = (0.5 - 0.75)b, \quad (3)$$

где  $b$  – ширина щелей между стержнями.

Фракционный состав продуктов измельчения, прошедших через щели между отражательными стержнями, с достаточной точностью для инженерных расчетов можно также описать с помощью формулы Розина–Рамлера

$$D = 100[1 - \exp(-45.38b^{-2.3}\delta^{2.5})]. \quad (4)$$

В ходе всех исследований проводили замеры мощности, затраченной на привод мельницы. На рис. 6 приведены зависимости потребляемой мельницей мощности от нагрузки по материалу. Из графика видно, что уже на холостом ходу мельницы потребляют от 1.8 до 3 кВт электроэнергии. Основная доля этой энергии приходится на работу ее как вентилятора. Кривые 1–3 (рис. 6) получены при исследовании мельницы (рис. 1, а), в которой непрерывная проточная классификация осуществляется за счет установки отражательных стержней на расстоянии 1 мм друг от друга. При измельчении известки (кривая 1) гранулы за счет удара распадаются на мелкие кристаллы, размер которых меньше 0.5 мм (что хорошо видно из рис. 2), и они подхватываются воздушным потоком, легко проходят через щели между стержнями, не задерживаясь в зоне измельчения. Поэтому энергия здесь затрачивается только на разгон частиц. Кривые 2, 3 получены при измельчении в этой мельнице гипсового камня и зерна. Эти материалы при ударе не полностью измельчаются до частиц менее 0.5 мм и накапливаются в зоне измельчения, поэтому дополнительный помол идет за счет истирания в этой зоне

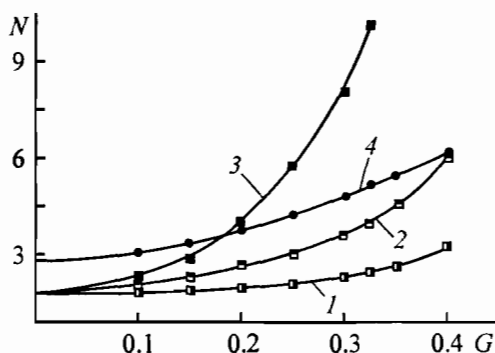


Рис. 6. Зависимость потребляемой мощности  $N$  (кВт) от нагрузки по материалу  $G$  (кг·с<sup>-1</sup>).

Измельченное вещество: 1 — известь; 2 — гипсовый камень; 3, 4 — зерно ячменя.

Вариант конструкции мельницы: 1–3 — первый (рис. 1, а), 4 — третий (рис. 1, в).

и, естественно, потери мощности значительно возрастают, особенно при больших нагрузках.

Следовательно, мельницы первой и второй конструкций (рис. 1, а, б) можно рекомендовать для измельчения таких материалов, как известь, мел, комья сухой глины, гранулы и кристаллы солей. При небольших нагрузках до 200 кг·ч<sup>-1</sup> и диаметре ротора 400 мм мельницы могут использоваться для помола более твердых материалов. Например, несколько мельниц (рис. 1, б) используются длительное время для помола корней и трав при производстве лекарств, пищевых добавок.

Кривая 4 показывает рост потребляемой мощности при измельчении зерна ячменя в мельнице третьей конструкции (рис. 1, в). В этой мельнице застойных зон нет, а материал измельчается двухступенчатым ударным нагружением, поэтому с возрастанием нагрузки на мельницу плавно растет и расходуемая мощность.

### Выводы

Качество помола материалов малой и средней прочности в ударно-центробежных мельницах значительно выше, чем в широко применяемых в настоящее время для этих целей молотковых мельницах. При этом удельный расход электроэнергии на 20–30% ниже. Целесообразно заменить молотковые мельницы на ударно-центробежные.

### Список литературы

- [1] Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В. Зарогатский Л.П. и др. // Селективное разрушение минералов. М.: Недра, С. 135–162.
- [2] Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. // Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1980. С. 110–134.
- [3] Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. М.: Химия, 1977. 382 с.
- [4] Пат. 4707 РБ, В 02 С 13/14. Мельница.
- [5] Пат. 3011 РБ, В 02 С 13/08. Центробежная мельница.
- [6] Пат. 4706 РБ, В 02 С 13/14. Мельница.