

## ЛИТЕРАТУРА

1. Основы металлургии / Под ред. Н.С. Грейвера. Т. II. Москва. 1962. 792 с.
2. Киш Л. Кинетика электрохимического растворения металлов. М.: Мир. 1990. 272 с.
3. Колотыркин Я.М., Флорианович Г.М. // Итоги науки и техники. Сер. Коррозия и защита от коррозии. М.: 1975. Т. 4. С. 5-45.
4. Флорианович Г.М. // Итоги науки и техники. Сер. Коррозия и защита от коррозии. М.: 1978. Т. 6. С. 136.
5. Сухотин А.М. Физическая химия пассивирующих пленок на железе. Л.: Химия. 1989. 319 с.
6. Справочник по электрохимии / Под ред. Сухотина А.М. Л.: Химия. 1981. 486 с.
7. Овари Ф., Ротинян А.Л. Электрохимия. 1970. Т. 6. Вып. 4. С. 528-533.
8. Подобаев А.Н., Джанибахчиева Л.Э., Колотыркин Я.М. Электрохимия. 1996. Т. 32. Вып 5. С. 549-553.
9. Симанова С.А. и др. ЖПХ. 1976. Т 49. Вып. 3. С. 566-569.
10. Симанова С.А., Кукушкин Ю.Н., Маслов Е.И. Изв. Сиб. отд. АН СССР. Сер. хим. н. 1974. Вып. 2. С. 64-66.
11. Маслов Е.И. и др. Изв. Сиб. отд. АН СССР. Сер. хим. н. 1974. Вып. 2. С. 67-70.
12. Кукушкин Ю.Н. и др. ЖПХ. 1970. Т. 43. Вып. 8. С. 1827-1830.
13. Симанова С.А. и др. ЖПХ. 1982. Т. 55. Вып. 10. С. 2240-2246.
14. Симанова С.А., Кукушкин Ю.Н., Башмаков В.И. ЖПХ. 1985. Т. 58. Вып 8. С. 1760-1764.
15. Симанова С.А. и др. ЖПХ. 1985. Т. 58. Вып 8. С. 1765-1771.
16. Гинзбург С.И. и др. Аналитическая химия платиновых металлов. М.: Наука. 1972. 616 с.
17. Романовская Л.Е. и др. Завод. лабор. 1994. Т. 60. № 8. С. 1-4.
18. Яцимирский К.Б. Кинетические методы анализа. М.: Госхимиздат. 1963. 190 с.
19. Делахей П. Двойной слой и кинетика электродных процессов. М.: Мир. 1967. 352 с.
20. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А. Введение в электрохимическую кинетику. М.: Высшая школа. 1975. 416 с.
21. Фетгер К. Электрохимическая кинетика. М.: Химия. 1967. 856 с.
22. Все о коррозии. Терминологический справочник / Под ред. А.М.Сухотина. СПб.: Химиздат. 2000. 518 с.
23. Маршаков И.К. и др. Анодное растворение и селективная коррозия сплавов. Воронеж.: Изд-во Воронежского университета. 1988. 204 с.

Кафедра технологии электрохимических производств

УДК 621.926.4

А.Э. Левданский

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ УДАРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

*Приводятся основные пути снижения энергозатрат при измельчении материалов. Предлагается практическая реализация этих путей во вновь разработанной конструкции двухступенчатой ударно-центробежной мельницы с проточной классификацией. Приведены результаты экспериментальных исследований разработанной конструкции.*

Измельчение материалов широко используется не только в химической промышленности, но и во многих других отраслях промышленности. В тоже время процессы измельчения являются весьма энергоемкими. Поэтому, поиску путей снижения энергозатрат при помоле уделяется большое внимание многих исследователей. Для снижения энергозатрат при измельчении многими специалистами предлагается [1-3].

а) измельчение материалов осуществлять 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 необходимо осуществлять классификацию с целью отвода из измельчителя только мелкой фракции, и возврата крупной фракции на повторное измельчение.

Попытка реализации перечисленных принципов предпринята в ряде разработанных конструкций ударно-центробежных мельниц [4]. Наиболее перспективной для промышленного ис-

пользования является ударно-центробежная мельница представленная на рис. 1 [5].

Мельница состоит из вертикального цилиндрического корпуса 1 с плоским дном 2 и съемной крышки 3. Внутри мельницы соосно корпусу 1 установлен вал 4, на котором смонтированы рабочие диски 5 с лопатками 6. Концентрично рабочим дискам 5 на небольшом расстоянии от наружных кромок лопаток 6 установлены отражательные стержни 7. Зоны помола верхнего и нижнего рабочих дисков 5 соединены между собой пересыпным конусом 8. Для подачи исходного материала на измельчение в съемной крышке 3 выполнен патрубок 9. Для отвода готового продукта в днище 2 имеется кольцевое окно 10 под которым смонтирован разгрузочный тангенциальный патрубок 11.

Работает мельница следующим образом. Измельчение материала на обеих ступенях мельницы осуществляется путем ударного нагружения. Для этого исходный материал через патрубок 9 подается в цилиндрический корпус 1 мельницы.

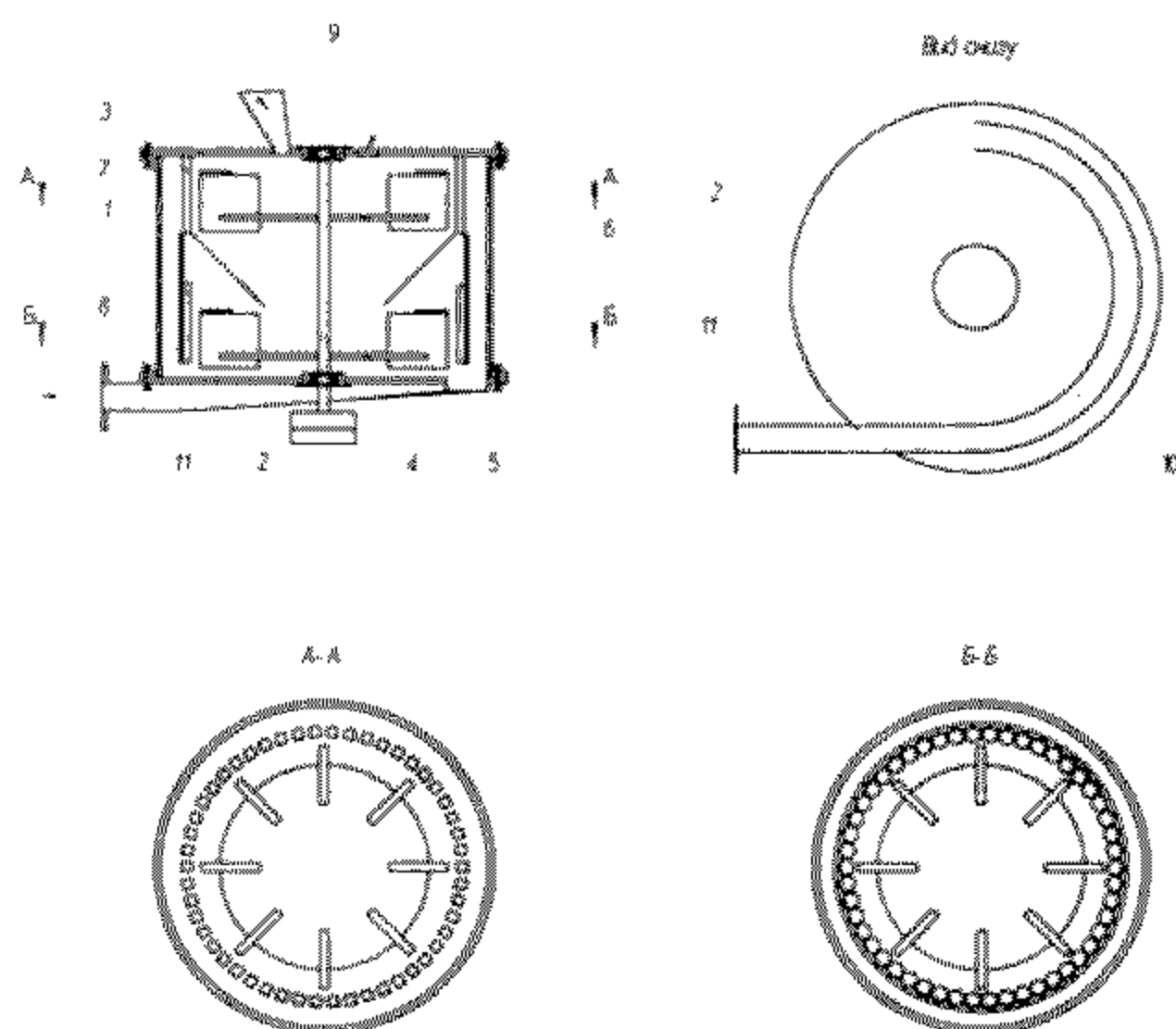


Рис. 1. Ударно-центробежная мельница. 1 – корпус; 2 – дно; 3 – крышка; 4 – вал; 5 – диск; 6 – лопатки; 7 – отражательные стержни; 8 – конус; 9 – питательный патрубок; 10 – кольцевое окно; 11 – разгрузочный патрубок.

Fig. 1 Beater-ring mill. 1-casing; 2-bottom; 3-cover; 4-shaft; 5-disk; 6-blades; 7-reflecting bars; 8-cone; 9-supply pipe; 10-window; 11-outlet pipe.

В мельнице посредством движения сплошной среды частицы материала воздушным потоком транспортируются к лопаткам 6. Вращающимися лопатками 6 частицы разгоняются до высоких скоростей. Сорвавшиеся с лопаток 6 частицы материала ударяются об отражательные стержни 7, где за счет удара происходит их измельчение. На верхней ступени мельницы отражательные стерж-

ни 7 установлены с определенным зазором между собой. Поэтому совокупность отражательных стержней 7 на верхней ступени мельницы является не только поверхностью измельчения, но и поверхностью проточного классификатора. После удара материала об отбойную поверхность тонко измельченные частицы за счет центробежной силы и воздействия истекающего воздушного потока, проходят в зазоры между стержнями 7. В зонах помола создается вихревое движение воздуха, за счет такого движения и косоугольного удара материала об отбойную поверхность измельченные частицы подходят к зазору между стержнями 7 под углом. Следовательно, в зазор между стержнями 7 могут проходить частицы, размер которых значительно меньше размера щелей, что исключает забивку этих зазоров. Расчеты и экспериментальные исследования показывают, что через зазор проходят частицы, размер которых в два-три раза меньше величины этого зазора. Подбирая необходимую скорость вращения диска 5 с лопатками 6, и устанавливая стержни с определенным зазором между собой можно достигать требуемой тонины отводимого материала. Пронесшие через зазор частицы далее двигаются совместно с воздухом в зазоре между стержнями 7 и цилиндрическим корпусом 1 после этого через кольцевое окно 10 и тангенциальный разгрузочный патрубок 11 выводятся из мельницы как готовый продукт. Крупные частицы, не задерживаясь в зоне помола, посредством пересыпного конуса 8 поступают на вторую ступень измельчения, где вращающимися лопатками 6 вновь разгоняются до высоких скоростей и подвергаются повторному ударному нагружению. Во второй ступени мельницы отражательные стержни 7 установлены вплотную друг к другу, так как на этой ступени происходит только окончательный помол частиц. Затем частицы материала уносятся воздушным потоком в кольцевое окно 10 в днище 2, откуда через тангенциальный патрубок 11 вместе с тонкими частицами, полученными на первой ступени транспортируются к циклону и фильтру.

Основными критериями эффективности помола для любой конструкции измельчителя являются удельная энергоёмкость и качество получаемого продукта. Для оценки энергоёмкости наиболее часто используют отношение расходуемой энергии к количеству измельчаемого материала (кВтч/т). Наиболее полным показателем качества получаемого продукта является его гранулометрический (фракционный) состав (распределение частиц по размерам).

На энергоёмкость и качество помола оказывают влияние как параметры самого процесса измельчения, так и характеристики измельчаемого

материала. Параметрами процесса ударного измельчения являются скорость удара, число ударов, угол удара, удельная нагрузка по материалу, геометрические размеры узлов и деталей мельницы и т.д. К характеристикам измельчаемого материала следует отнести его геометрические размеры, физико-механические параметры (твердость, модуль упругости, предел прочности), влажность и т.д. Учесть влияние всех параметров процесса измельчения и характеристик исходного материала при составлении теоретической модели разрушения материала ударом практически не возможно, и поэтому оценка эффективности процесса измельчения на разработанных конструкциях мельниц определялась экспериментальными исследованиями. В начале изучалась степень ударного измельчения материала при однократном его прохождении через одну ступень мельницы. Исследования проводили с использованием конструкции соответствующей второй ступени уже рассмотренной мельницы рис. 1, в которой отражательные стержни 7 как круглого, так и прямоугольного сечения устанавливались вплотную друг к другу (без зазора). Исследования проводились на мельнице с диаметром ротора по концам лопаток 400 мм при изменении скорости вращения от 750 до 2900 об/мин.

Результаты однократного ударного измельчения материалов представлены на графиках рис. 2 – рис. 4 в виде функции распределения, где по оси абсцисс отложен размер частицы ( $\delta$ ), а по оси ординат значение  $D$  в процентах равно отношению массы частиц диаметр которых меньше ( $\delta$ ) к общей массе продукта помола. Кривые фракционного распределения продуктов ударного разрушения представленные на рис.2 получены при скорости вращения ротора 2900 об/мин для различных материалов: известь, мел, гипсовый камень, сильвинит, зерно ячменя. Во всех опытах на измельчение подавался материал в количестве 460–520 кг/ч с размером исходных частиц 4–8 мм. Из графика видно, что при ударном одноразовом нагружении наиболее тонко измельчаются гранулы извести и частички мела, и как показывает анализ продуктов помола под микроскопом, они практически рассыпаются до мелких кристаллов. Значительно хуже разрушается зерно и прежде всего его эластичная оболочка.

Дальнейшие опыты проводились при измельчении сильвинита и на графиках рис. 3 представлен фракционный состав продуктов помола при изменении нагрузки по исходному материалу от 0.061 до 0.333 кг/с (220–1200 кг/ч), а на графиках рис. 4 – фракционный состав продуктов помола при различных оборотах ротора.

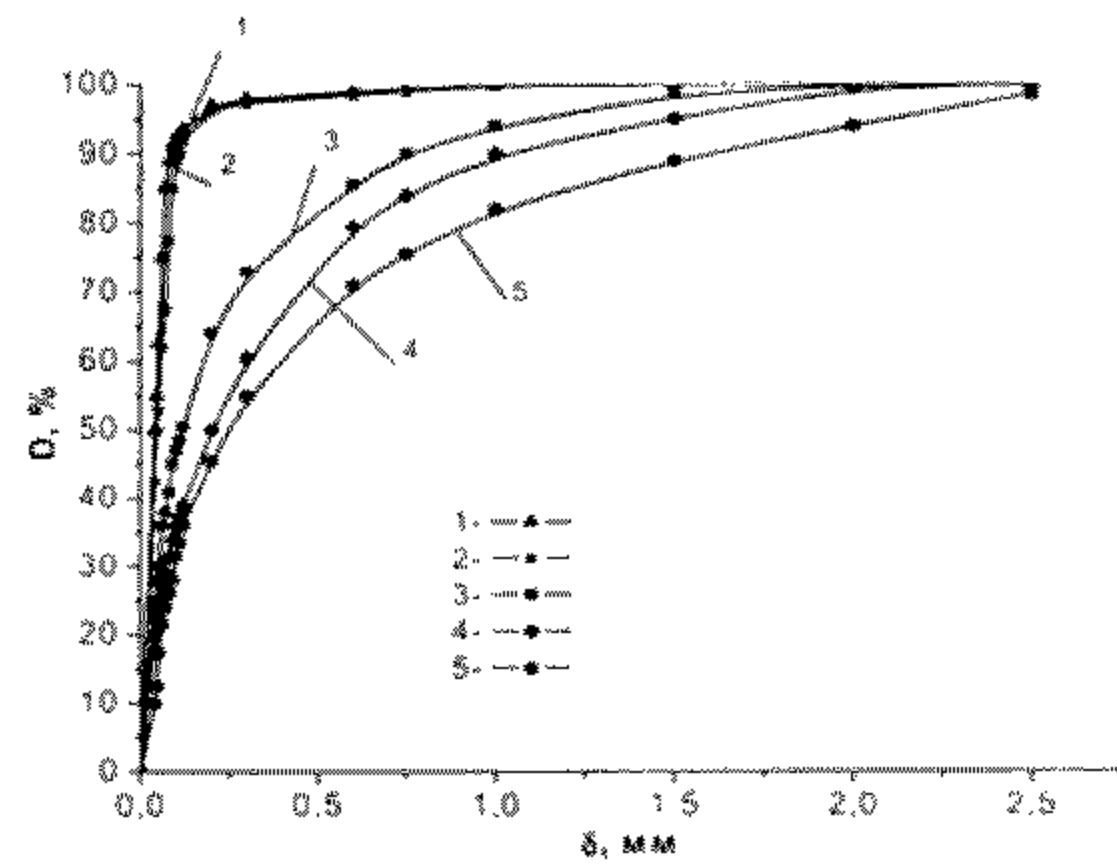


Рис. 2. Фракционный состав продуктов ударного измельчения различных материалов. 1 – известь (гранулы 4–8 мм); 2 – мел (частицы 4–8 мм); 3 – гипсовый камень; 4 – сильвинит (частицы 3–10 мм); 5 – зерно (ячмень)  
Fig. 2. Fractional composition of beater grinding products. 1 – lime (4–8 mm granules); 2 – chalk (4–8 mm particles); 3 – gypsum stone; 4 – sylvinit (3–10 mm particles); 5 – barley corn.

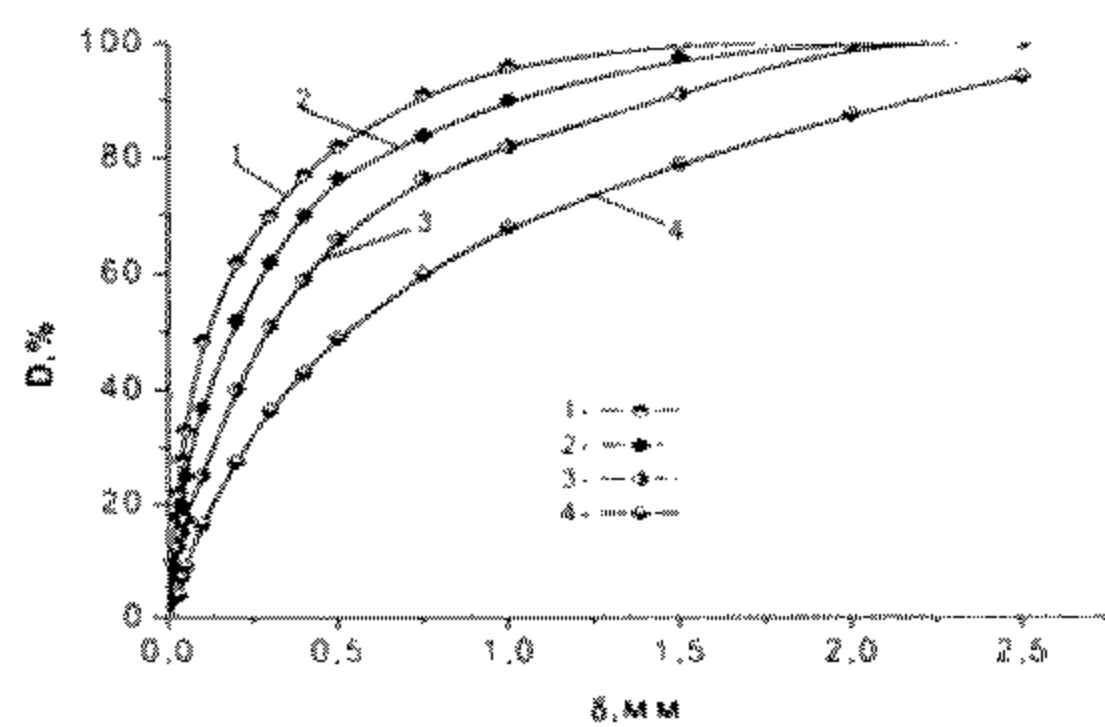


Рис. 3. Фракционный состав продуктов ударного измельчения сильвинита при различной производительности. 1 – 0.061 кг/с (220 кг/ч); 2 – 0.133 кг/с (480 кг/ч); 3 – 0.211 кг/с (760 кг/ч); 4 – 0.333 кг/с (1200 кг/ч)  
Fig. 3. Fractional composition of beater grinding of sylvinit. 1 – 0.061 kg/s (220 kg/hr); 2 – 0.133 kg/s (480 kg/hr); 3 – 0.211 kg/s (760 kg/hr); 4 – 0.333 kg/s (1200 kg/hr)

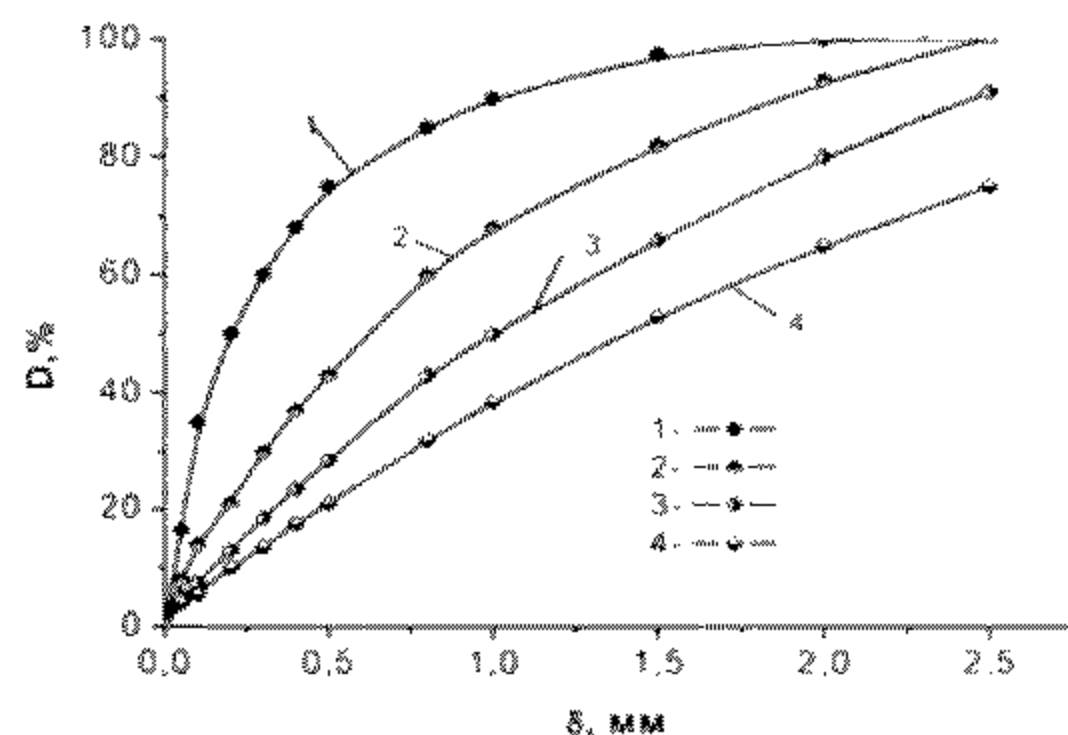


Рис. 4. Фракционный состав продуктов помола сильвинита при различных оборотах ротора. 1 –  $w=62.8$  м/с ( $n=3000$  об/мин); 2 –  $w=33$  м/с ( $n=1500$  об/мин); 3 –  $w=21$  м/с ( $n=1000$  об/мин); 4 –  $w=16$  м/с ( $n=7500$  об/мин)  
Fig. 4. Fractional composition of the products of grinding sylvinit at different rotor revolutions 1 –  $w=62.8$  m/s ( $n=3000$  rev./min.); 2 –  $w=33$  m/s ( $n=1500$  rev./min.); 3 –  $w=21$  m/s ( $n=1000$  rev./min.); 4 –  $w=16$  m/s ( $n=7500$  rev./min.).

Математическая обработка экспериментальных данных с использованием формулы Розина-Рамлера позволила получить зависимость (1) для описания фракционного состава продуктов при одноразовом ударном измельчении материалов в разработанной ударно-центробежной мельнице представленной на рис. 1

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

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

Для определения размера частиц  $\delta_{50}$  получена эмпирическая зависимость (2), учитывающая характеристики измельчаемого материала, нагрузку на мельницу по измельчаемому материалу, а также окружную скорость ротора по концам лопаток

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

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

Анализ самых крупных частиц в продуктах помола показывает, что величина их даже при измельчении зерна и гипсового камня в 2.5–3 раза меньше размера исходного материала.

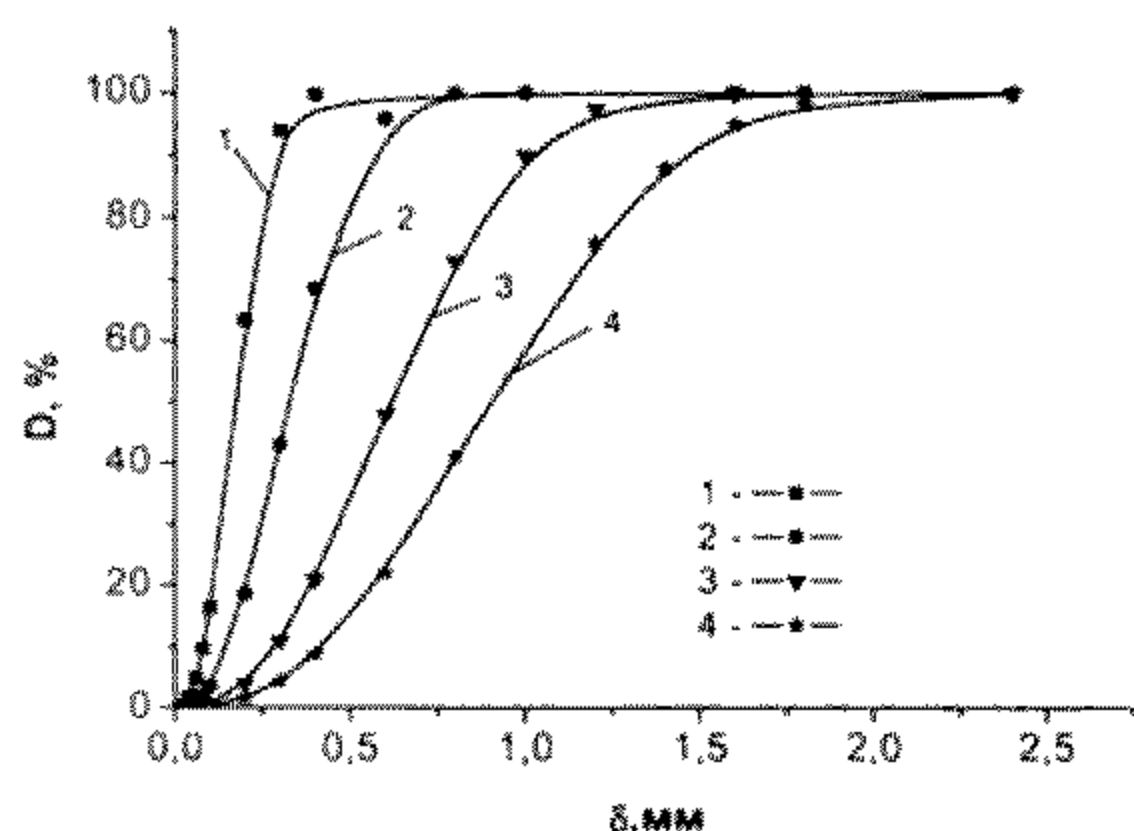


Рис. 5. Фракционный состав продуктов помола сильвинита в мельнице рис. 1(а) при различных размерах щелей. 1 –  $b=0.5$  мм; 2 –  $b=1$  мм; 3 –  $b=2$  мм; 4 –  $b=3$  мм  
Fig.5. Fractional composition of the products of sylvinitite grinding in the mill ( Fig.1) at different slit sizes.

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 проводилось на конструкции выполненной в соответствии с верхней ступенью мельницы представленной на рис. 1. Здесь отражательные стержни имели квадратное сечение (14x14 мм), а расстояние между ними изменялось от 0.5 до 4 мм. Исследования проводились сначала при измельчении сильвинита, а потом и других материалов, при скорости вращения ротора 2300 и 1450 об/мин и нагрузке по материалу 0.133 кг/с. В процессе опытов постоянно определялся фракционный состав продуктов помола прошедших через щели между стержнями. Проведенные опыты результаты которых представлены на графике рис. 5, показали, что основным критерием определяющим фракционный состав продуктов помола является величина зазора между стержнями. Максимальный размер частиц, прошедших через зазор во всех опытах и с различными материалами, составляет

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

где  $b$  – величина зазора между стержнями.

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

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

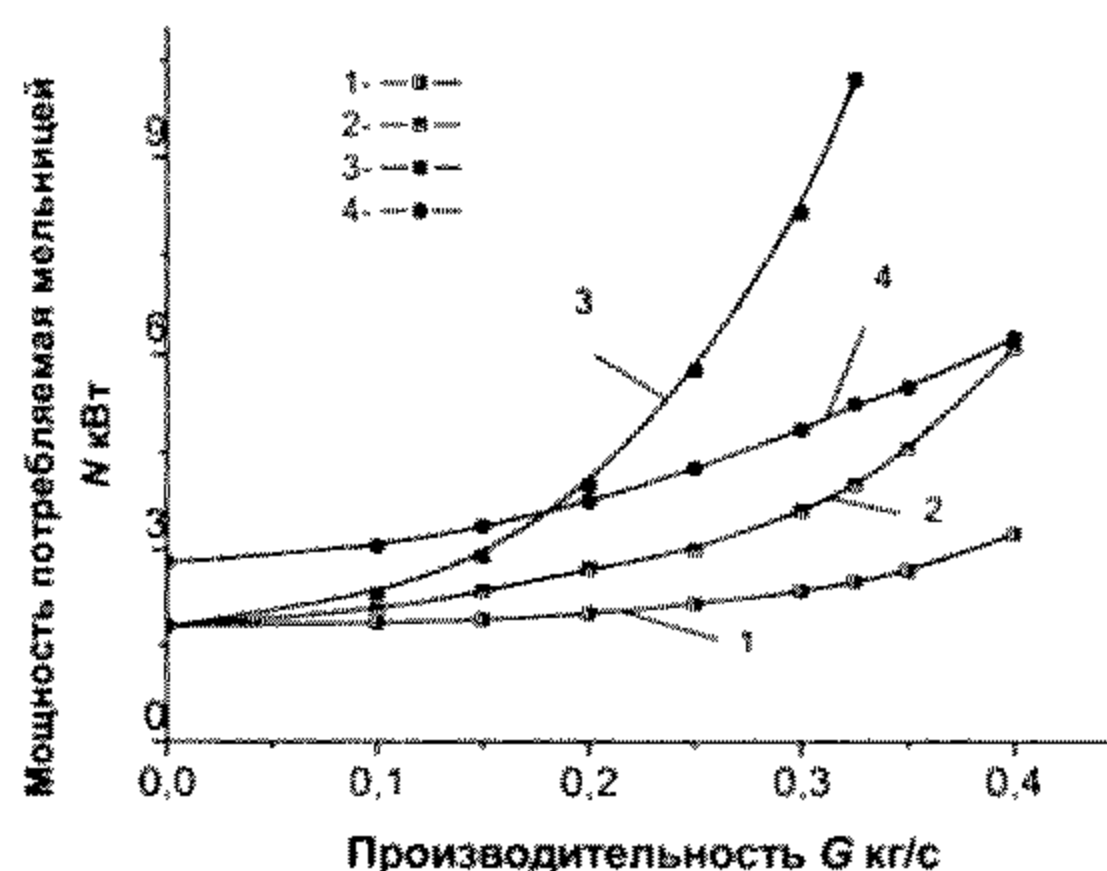


Рис. 6. Зависимость потребляемой мощности от нагрузки по материалу. 1 – мельница как верхняя ступень – известь; 2 – мельница как верхняя ступень – гипсовый камень; 3 – мельница как верхняя ступень – зерно ячменя; 4 – двухступенчатая мельница – зерно ячменя  
Fig.6. Power consumed as a function of material load. 1- the mill as an upper stage-lime; 2-gypsum; 3-barley corn; 4-two-stage mill- barley corn.

В ходе всех исследований производились замеры мощности затраченной на привод мельницы. На графике рис. 6 приведены зависимости по-

требляемой мельницей мощности в зависимости 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, 2, 3 получены при исследовании установки выполненной как верхняя ступень мельницы рис. 1, в которой непрерывная проточная классификация осуществляется за счет установки отражательных стержней с зазором 1 мм между собой. При измельчении извести (кривая 1) гранулы за счет удара распадаются на мелкие кристаллы размер которых меньше 0.5 мм (что хорошо видно из графика рис. 2) и они подхватываются воздушным потоком, легко проходят через зазоры между стержнями, не задерживаясь в зоне измельчения. Поэтому энергия здесь затрачивается только на разгон частиц. Кривые 2 и 3 получены при измельчении в этой установке гипсового камня и зерна. Эти материалы при ударе не полностью измельчаются до частиц менее 0.5 мм и поэтому они накапливаются в зоне измельчения и дополнительный помол идет за счет истирания в зоне измельчения и естественно потери мощности значительно возрастают, особенно при больших нагрузках. Кривая 4 показывает рост потребляемой мощности при измельчении зерна ячменя в

двухступенчатой мельнице рис. 1. В этой мельнице застойных зон нет, а материал измельчается двухступенчатым ударным нагружением, поэтому с возрастанием нагрузки на мельницу плавно возрастает и потребляемая мощность.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что качество помола материалов малой и средней прочности в ударно-центробежной мельнице значительно выше, чем в широко применяемых в настоящее время для этих целей молотковых мельницах. При этом удельный расход электроэнергии на 20–30 % ниже. Поэтому в ближайшее время ударно-центробежные мельницы могут заменить молотковые.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ревнивцев В.И. и др. Селективное разрушение минералов. М.: Недра. 287 с.
2. Андреев С. Е., Перов В. А., Зверевич В. В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра. 1980. 415 с.
3. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности. М.: Химия. 1977. 382 с.
4. Левданский А.Э., Левданский Э.И. Высокоэффективные проточные процессы и аппараты. Минск.: БГТУ. 235 с.
5. Левданский А.Э., Вилькоцкий А.И., Левданский Э.И. «Мельница» Патент РБ № 4706 В 02 С 13/14.

Кафедра машин и аппаратов химических и силикатных производств

УДК 547.582.2

И.Г. Абрамов, А.В. Смирнов, М.В. Воронько, А.В. Сапегин,  
Г.С. Амазаспян, Г.Л. Арутюнян, В.В. Плахтинский

### ВОЗМОЖНОСТИ 4-(ДИАЛКИЛАМИНО)-5-НИТРОФТАЛОНИТРИЛОВ В РЕАКЦИИ АРОМАТИЧЕСКОГО НУКЛЕОФИЛЬНОГО ЗАМЕЩЕНИЯ

(Ярославский государственный технический университет)

abramovig@ystu.ru

*На основе 4-(диалкиламино)-5-нитрофталонитрила реакцией нуклеофильного замещения нитрогруппы различными O-, S- и N- нуклеофилами были получены с высокими выходами не описанные в литературе производные. Показано дезактивирующее влияние морфолинового заместителя на указанную реакцию.*

Взаимодействие 4-бром-5-нитрофталонитрила 1 с различными моно- и бифункциональными O-, S- и N-нуклеофилами сравнительно под-

робно описано в ряде работ [1-8]. В результате последовательно протекавших реакций замещения атома брома и нитрогруппы в указанном субстра-