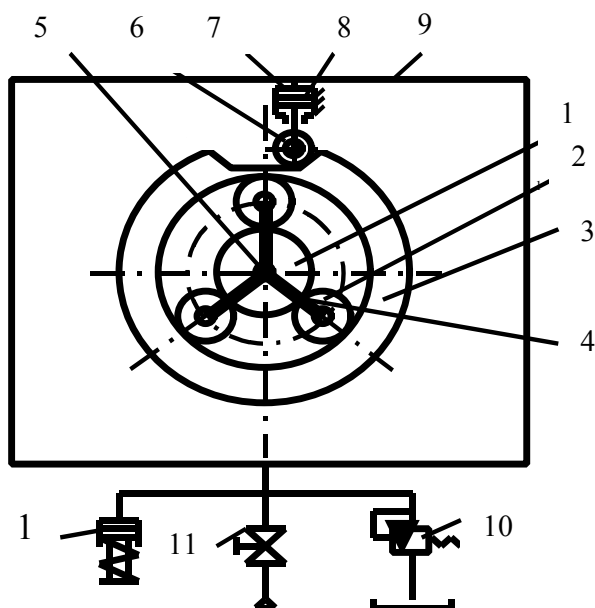


## Підготовчі процеси збагачення

звездообразным профилем начинает вращаться со скоростью, пропорциональной скорости входного вала.



Принципиальная схема предохранительного устройства

Для восстановления кинематической связи между ведущим и ведомым звеньями, т.е. для восстановления рабочего состояния предохранительного устройства, необходимо открыть напорный золотник 11 и от постороннего источника питания заполнить гидросистему рабочей жидкостью при давлении, меньшем давления настройки предохранительного клапана 10. Для того чтобы плунжер 8 полностью выдвинулся, а ролик попал во впадину звездообразного профиля эпициклической шестерни, заполнение гидросистемы жидкостью необходимо производить на затухающих оборотах приводного электродвигателя.

© Петрушкин Г.В., Зубарев А.В., 2005

*Надійшла до редколегії 10.09.2004 р.  
Рекомендовано до публікації к.т.н. В.В. Гаєвим*

УДК 622.73

**А.Д. ПОЛУЛЯХ**, д-р техн. наук

53

**Збагачення корисних копалин, 2005. – Вип. 22(63)**

(Украина, Днепропетровск, Приднепровская лаборатория "УкрНИИУглеобогашение"),

**С.Н. БАЗАРНЫЙ, С.М. ЛАГУТЕНКО**

(Украина, Днепропетровск, ЗАО "Ана-Темс")

### ИЗМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕРНИСТЫХ СРЕД В ПРОЦЕССЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Известные работы по кинетике измельчения Андреева С.Е., Товарова В.В., Лифлянда Д.И., Тунцова А.Г., Загустина А.И. и других исследователей [1–3] в основном объяснили влияние различных факторов на скорость измельчения материалов. При этом согласно уравнению Нильсона уменьшение ситовых остатков по длине мельницы происходит по экспоненциальной кривой. Исследованиями Лифлянда Д.И. и Тунцова А.Г. подтверждено, что скорость образования готового продукта, снижаясь по длине мельницы, сильно замедляется в ее конце [2].

Отмеченные выше закономерности нашли свое отражение в сформулированном Загустиным А.И. законе, согласно которого количество дробящегося в единицу времени материала какого-либо класса прямо пропорционально содержанию недробленого материала того же класса в мельнице [3]. Данное уравнение реакции первого порядка по данным Митрофанова С.И. [4] применимо и для материалов сложного минералогического состава.

Значительным этапом в изучении закономерностей измельчения явились работы Андреева С.Е., Товарова В.В. и Перова В.А. [1]. Для случая работы шаровой мельницы ими было получено классическое уравнение кинетики размола:

$$R_t = R_o K^{t^m}, \quad (1)$$

где  $R_o$ ;  $R_t$  – содержание крупного класса в начале и по истечении времени  $t$ ;  $K$ ;  $m$  – параметры, зависящие от условий измельчения и свойств материала.

Данное уравнение широко используется при изучении процесса измельчения материалов, однако оно не объясняет влияния гранулометрического состава загрузки мельниц на эффективность процесса измельчения и прямо не указывает на пути его интенсификации.

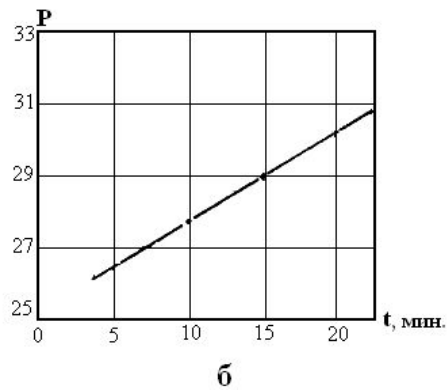
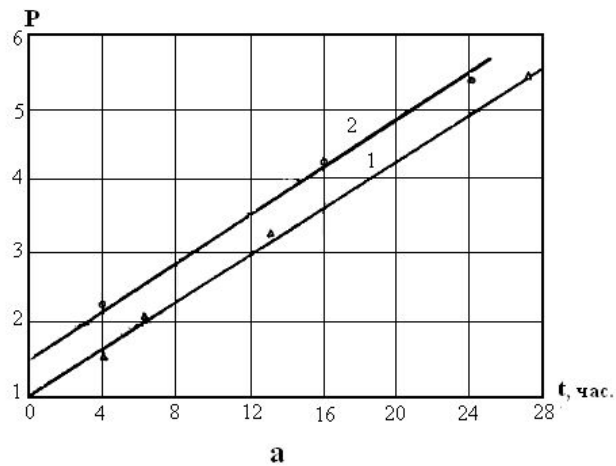
Для изучения изменения энергетического состояния зернистых смесей и, следовательно, изменения гранулометрического состава загрузки мельниц в процессе измельчения были проведены эксперименты, а также проанализированы данные исследований других авторов [5–8]. На основании этих данных получены зависимости изменения гранулометрического параметра измельчаемого материала от времени измельчения и длины транспортирования,

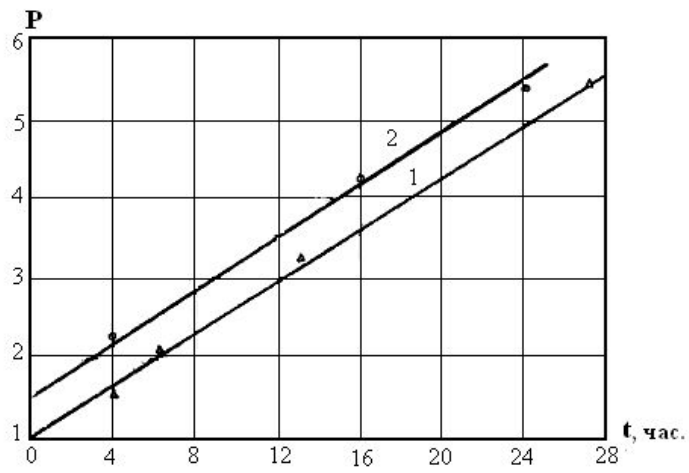
которые приведены на рис. 1–3.

Анализ рис. 1–3 показывает, что во всех случаях эта зависимость имеет прямолинейный характер вида:

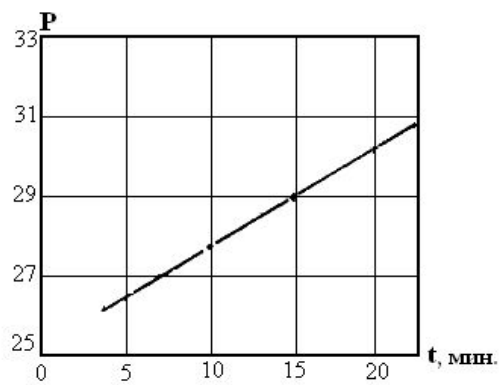
$$P = P_0 + bt, \quad (2)$$

где  $P$  – текущий гранулометрический параметр;  $P_0$  – первоначальный гранулометрический параметр;  $t$  – время измельчения, мин.;  $b$  – удельное изменение гранулометрического параметра (удельная скорость измельчения), 1/мин.





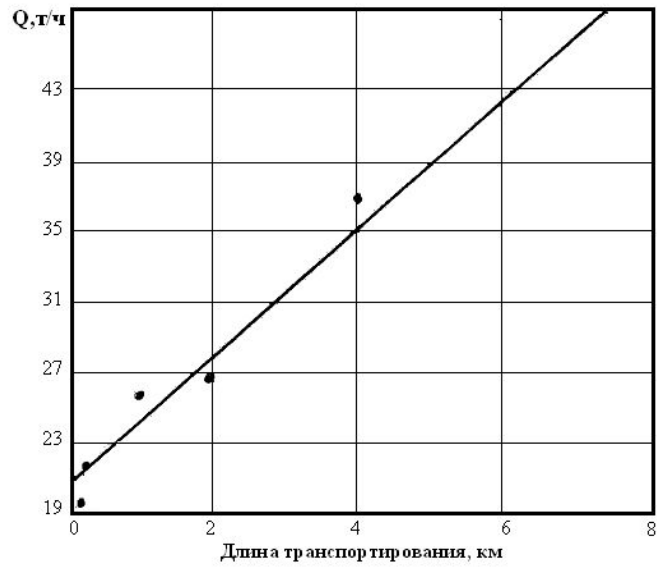
а



б

Рис. 1. Зависимость гранулометрического параметра от времени измельчения:  
а) 1 – магнетитовая руда, 2 – уголь;  
б) марганцевая руда

## Підготовчі процеси збагачення



а



б

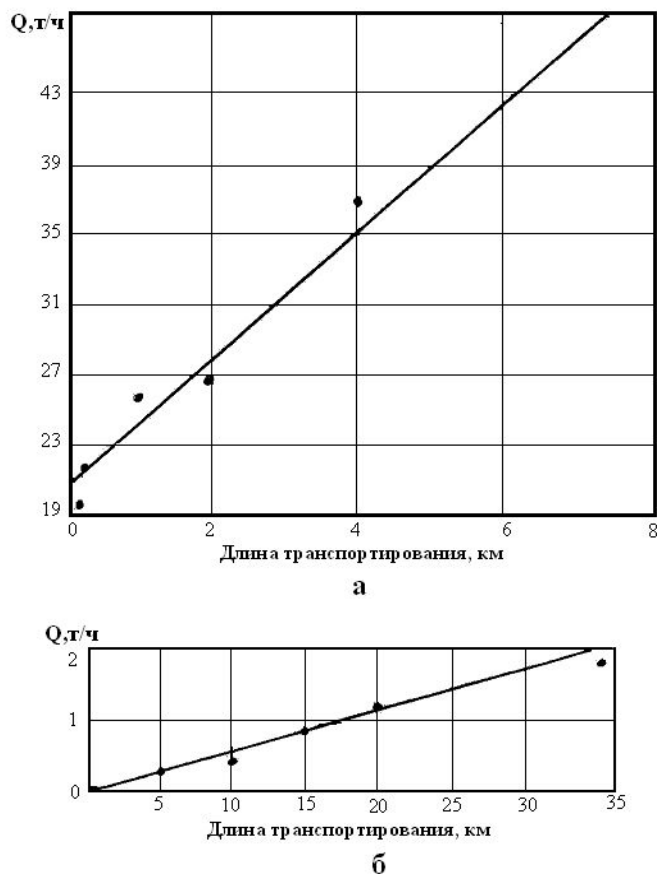


Рис. 2. Зависимость гранулометрического параметра среды от длины транспортирования: а) уголь; б) пирит

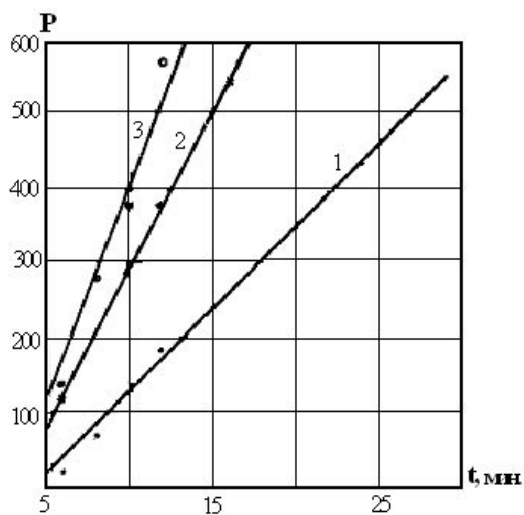


Рис. 3. Зависимость гранулометрического параметра загрузки шаровой мельницы от времени измельчения:  
1 – кварц; 2 – сульфидная; 3 – окисленная медная руда

Выражение (2), отражая энергетическое состояние загрузки мельницы, одновременно отвечает на вопрос о расходе энергии на измельчение.

При решении задачи о расходе энергии на измельчение известная гипотеза Риттингера исходит из того, что работа, затраченная при дроблении пропорциональна вновь обнаженной поверхности измельченного материала. Гипотеза Кирпичева и Кикка предполагает, что работа разрушения пропорциональна уменьшению первоначального объема дробимого куска. Другие гипотезы Бонда, Ребиндера связывают затраченную работу и с объемом и с поверхностью измельченного материала. Как отмечается в работе [9], методы решения задачи о расходе энергии на измельчение материала, предложенные Риттингером и Кирпичевым-Кикком, основаны на определенном физическом истолковании процесса. Метод же Бонда такого истолкования не имеет. Нельзя представить себе физической картины, которая бы характеризовалась квадратным корнем произведения поверхности на объем тела. Так же непонятны модели, когда работа измельчения пропорциональна линейному размеру куска в какой-либо дробленной степени.

Хотя первые две гипотезы и основаны на определенной физической модели процесса измельчения, в практике они редко подтверждаются. В связи с указанными недостатками предложенных гипотез, ни одна из них не получила широкого применения.

Прямолинейный характер зависимости гранулометрического параметра загрузки мельницы от времени измельчения означает, что расход энергии на измельчение прямо пропорционален гранулометрическому параметру загрузки мельницы, так как расход энергии  $E$  пропорционален времени измельчения  $t$

$$E = N_o t ,$$

где  $N_o$  – полезная мощность привода, то заменяя  $t$  его значением из выражения (2) получим:

$$E = N_o \left( \frac{P - P_o}{b} \right) \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что чем больше достигаемый гранулометрический параметр  $P$  загрузки мельницы, тем больше затраты энергии. В другом случае, чем ближе начальный гранулометрический параметр  $P_o$  к достигаемому  $P$ , тем меньше затраты энергии.

Физический смысл этой закономерности состоит в следующем. Гранулометрический параметр [10] любой зернистой среды определяется как отношение средневзвешенного диаметра частиц скелета  $d_c$  к средневзвешенному диаметру частиц заполнителя среды  $d_z$ . Вместе с тем гранулометрический параметр можно выразить отношением удельной

поверхности заполнителя к удельной поверхности скелета среды, так как удельная поверхность пропорциональна обратной величине средневзвешенного диаметра частиц, т.е.

$$P = \frac{d_c}{d_3} = \frac{S_{o.з.}}{S_{o.с.}} \quad (4)$$

Поэтому, установленную закономерность измельчения можно трактовать следующим образом.

Расход энергии на измельчение зернистой среды прямо пропорционален отношению вновь образованных удельных поверхностей заполнителя и скелета среды.

При шаровом измельчении, шары как более твердые и более крупные тела становятся дробящей частью загрузки – скелетом, а измельченный материал заполнителем. При этом, износом дробящей части (шаров) за время прохождения материала через мельницу, можно пренебречь. Расход энергии на измельчение в этом случае будет прямо пропорционален гранулометрическому параметру всей загрузки, находящейся в мельнице, т.е. отношению среднего диаметра шаров к среднему диаметру частиц измельчаемого материала. На так как диаметр шаров величина постоянная, то расход энергии будет пропорционален только обратной величине среднего диаметра частиц измельчаемого материала или его удельной поверхности.

Таким образом, в шаровом измельчении гипотеза Риттингера является частным случаем общей закономерности, которая сформулирована выше.

Для доказательства справедливости изложенных положений нами обработаны экспериментальные данные по измельчению кварца, сульфидной и окисленной медной руды в шаровой мельнице [8].

Результаты обработки приведены на рис. 4.

Данные рис. 4 показывают, что обратная величина среднего диаметра измельчаемого материала (пропорциональная величина удельной поверхности) связана со временем измельчения или расходом энергии на измельчение прямолинейной зависимостью.



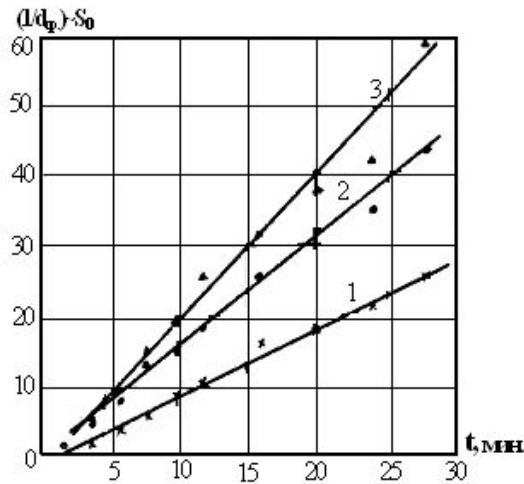


Рис. 4. Зависимость удельной поверхности измельчаемого материала от времени измельчения в шаровой мельнице:  
1 – кварц; 2 – окисленная; 3 – окисленная медная руда

Для процесса самоизмельчения материалов, в том числе для рудно-галечного измельчения установленная закономерность в ее общем виде также справедлива. Но так как в этом случае дробящей частью (скелетом) является крупная часть того же материала и износ ее за время прохождения материала через измельчающий аппарат значителен по сравнению с шарами, то это обстоятельство приводит к тому, что расход энергии в этом виде измельчения не находится в прямолинейной зависимости от удельной поверхности измельчаемой части материала. Эта зависимость имеет криволинейный характер. В тоже время расход энергии и в этом виде измельчения прямо пропорционален (в каждый момент времени) гранулометрическому параметру всей массы материала, находящейся в аппарате. Для доказательства этого обстоятельства нами обработаны экспериментальные данные по рудо-галечному измельчению магнетитовых кварцитов, приведенные в работах [11, 12]. Данные рис. 5 показывают, что обратная величина среднего диаметра частиц измельчаемой части руды, пропорциональная удельной поверхности, возрастает с увеличением времени измельчения в криволинейной зависимости от последнего. Таким образом, гипотеза Риттингера для этого вида измельчения не верна. Она верна только для измельчения, в котором дробящая часть загрузки не изменяет размеры своих тел за время прохождения материала через аппарат.

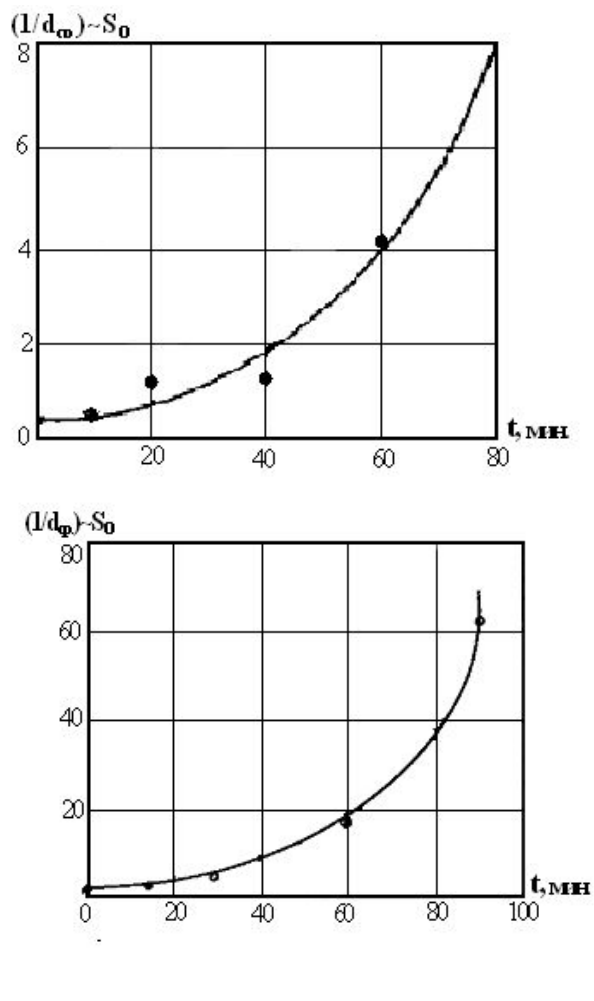


Рис. 5. Зависимость удельной поверхности материала от времени измельчения:  
 а) рудно-галечное в барабанной мельнице;  
 б) рудно-галечное в резонансной мельнице

Установленная закономерность о прямой пропорциональности расхода энергии получаемому гранулометрическому параметру измельчаемой загрузки полностью справедлива и для любого вида дробления. Расход полезной энергии в этом случае прямо пропорционален гранулометрическому параметру материала, находящегося в рабочем пространстве дробилки. Чем больше гранулометрический параметр материала, тем больше требуется затратить энергии на его дробление при прочих равных условиях. Известно, что наличие мелких фракций в питании конусных дробилок сдерживает форсирование режимов их эксплуатации по производительности, так как происходит запрессовка камеры дробления [12]. Это происходит в замкнутых циклах дробления, когда часть материала, возвращаемого в дробилку, имеет размер кусков меньше размера кусков основного питания. Добавка мелких фракций в питание снижает его порозность (увеличивает гранулометрический параметр),

## Підготовчі процеси збагачення

увеличивает его насыпную плотность, в результате увеличивается сопротивление материала раздавливанию, затрачивается больше энергии. В этом случае принцип Чечета "не дробит ничего лишнего" состоит не столько в том, что дробится готовый материал, как в том, что готовый продукт заполняет поры между крупными кусками, создает им подпорку, что увеличивает их сопротивление раздавливанию. Вывод мелочи из рабочего пространства измельчающего аппарата повышает порозность (снижает гранпараметр) измельчаемой среды. Материал (измельчаемая часть), подаваемый на измельчение, должен быть однородным по крупности, а в процессе измельчения его однородность все время должна поддерживаться, что возможно только при немедленном отводе мелочи.

Кроме этого, кинетическое уравнение (2) позволяет разработать метод определения измельчаемости минерального сырья. Согласно этого уравнения измельчаемость тем выше, чем больше удельная скорость измельчения –  $b$  при прочих равных условиях. Для определения измельчаемости достаточно определить гранулометрический параметр загрузки мельницы до начала и после некоторого времени измельчения. Тангенс угла наклона прямой, проведенной через две точки дает искомую величину удельной скорости измельчения. Опыты по размолу различных материалов, проведенных в одинаковых условиях, дают сравнительную величину измельчаемости. Так для измельчения кварца, сульфидной и окисленной медной руды (рис. 6) имеем:

кварц  $b = 22$  (1/мин.);

сульфидная руда  $b = 43,4$  (1/мин.);

окисленная руда  $b = 58,4$  (1/мин)

Исследования показывают, что выход готового класса, образующегося в процессе измельчения, прямо пропорционален гранулометрическому параметру (рис. 6). Прямая зависимость выхода готового класса от гранулометрического параметра объясняется тем, что увеличение гранулометрического параметра при измельчении происходит в основном за счет снижения крупности заполнителя.

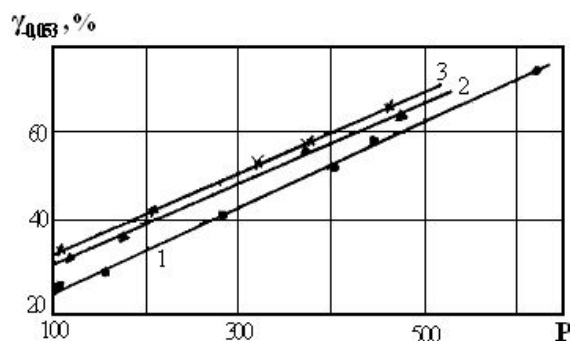


Рис. 6. Зависимость выхода класса  $-0,053$  мм от гранпараметра загрузки мельницы:  
1) кварц, 2) сульфидная, 3) окисленная медная руда

Таким образом, изменение энергетического состояния измельчаемого материала характеризуется его гранулометрическим параметром. На основании зависимости изменения гранулометрического состава измельчаемого материала в данном аппарате можно прогнозировать гранулометрический состав готового продукта, время его получения и энергетические затраты.

### Список литературы

1. Андреев С.Е., Товаров В.В., Перов В.А. Закономерность измельчения и исчисления характеристики гранулометрического состава. – М.: Металлургиздат. – 1959. – 437 с.
2. Лифлянд Д.И., Тунцов А.Г. Сравнение сухого измельчения в лабораторных шаровых мельницах в открытом и замкнутом циклах. – Л.: Сб. ин-та «Механобр». – 1935, т.1. – С.38–44.
3. Загустин А.И. Теория дробления в шаровой мельнице. – Л.: Сб. ин-та «Механобр». – 1935, т.1. – С.54–61.
4. Митрофанов С.И., Харина И.П. Закономерности дробления материалов сложного минералогического состава. // Цветные металлы. – 1979. – №2. – С.73–76.
5. Харламов В.С., Николаенко Б.И., Кирнос Э.Г. Измельчение марганцевых продуктов Грушевской обогатительной фабрики. // Горный журнал. Изв. ВУЗ, 1968. – №1. – С.165–169.
6. Куприн А.И. Безнапорный гидротранспорт. – М.: Недра. – 1980. – 244 с.
7. Гидравлическая добыча угля в Донбассе. – М.: ЦИТИУголь. – 1961. – 95 с.
8. Тунцов А.Г. Сравнение дробимости коунрадской руды с дробимостью кварца при тонком измельчении в шаровых мельницах в открытом и закрытом циклах. – М.: Сб. ин-та «Механобр» «Обогащение медных руд коунрадского месторождения». – 1935. – С.199–212.
9. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия. – 1968. – 377 с.
10. Клешнин А.А. Исследование процесса фильтрования угольных шламов различного гранулометрического состава. Дис... канд. техн. наук. – Донецк, ДПИ, 1974. – 148 с.
11. Денисенко А.И. Исследование самоизмельчения магнетитовых кварцитов Кривбасса. – Дис... канд. техн. наук, ДГИ. – 1965. – Т.1. – 180 с.
12. Потураев В.И., Кармазин В.И., Денисенко А.И., Франчук В.П., Тарасенко А.А. Исследование самоизмельчения магнетитовых кварцитов в резонансной мельнице // Обогащение полезных ископаемых, 1968. – №3. – С.32–36.
13. Муйземнек Ю.А. Возможность замкнутых циклов дробления. // Горный журнал, 1983. – №6. – С.26–27.

© Полулях А.Д., Базарный С.Н., Лагутенко С.М., 2005

*Надійшла до редколегії 12.04.2005 р.  
Рекомендовано до публікації*

УДК 622.73

**А.Д. ПОЛУЛЯХ**, д-т техн. наук, **В.Ф. НЕЛЕПОВ**

53

**Збагачення корисних копалин, 2005. – Вип. 22(63)**