

и перспективы развития технологии и оборудования для измельчения полезных ископаемых. // Черная металлургия. – 1990. – №11. – С. 2–10.

3. VERTIMILL: INSTALLATION LIST, SVEDALA INDUSTRIES, INC. METSO MINERALS / Form L-223 July 1999.

4. Изучение особенностей, разработка и внедрение способов снижения износа мелющих тел при измельчении железных руд / **Л.А. Ломовцев, А.С. Мамаев, Н.Н. Бережной, А.А. Ширяев**: Отчет (заключительный) -2,43-617-88 "Научно-исследовательский и проектный институт по обогащению и агломерации руд черных металлов (Механобрчермет)". – Кривой Рог, 1990.

© Ртищев А.Б., Борисова М.Н., Варченко Ю.Н., 2006

*Надійшла до редколегії 16.04.2006 р.*

*Рекомендовано до публікації*

УДК 622.7

**П.И. ПИЛОВ**, д-р техн. наук,

**А.А. ТИТОВ**, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

### **ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ОБОГАЩЕНИЯ**

*Актуальность проблемы.* Необходимость увеличения эффективности современных способов дезинтеграции полезных ископаемых не вызывает сомнений уже хотя бы потому, что на эти процессы в развитых странах расходуется по разным оценкам от 5 до 20% всей вырабатываемой электроэнергии. По этой причине примерно с 50-х гг. 20 в. началось бурное развитие отраслей дробления и измельчения как в области создания технологических аппаратов и экспериментальной отработки их рабочих циклов, так и подведение научного фундамента под уже имеющиеся инженерные разработки. В результате, к 70–80-м гг. 20 в. было создано достаточно большое количество конструкций дробилок и мельниц, а также более или менее рациональных методик их использования. Практически все методики опираются на полученную в результате многочисленных исследований теоретико-экспериментальную расчетную базу, позволяющую определить основные параметры рабочих органов, состав конечного продукта дезинтеграции, энергоемкость процесса разрушения материала и т.п.

Однако, реальная ценность проведенных исследований ограничена узкими рамками области применения того или иного технологического аппарата, полученные результаты трудно применимы к другим условиям дробления или измельчения и, фактически, представляют собой набор подтвержденных

опытным путем данных – экспериментальных точек и аппроксимирующих их кривых, дающих общие представления о логике взаимодействия помольной камеры, мелющих тел и измельчаемого материала внутри машины отдельного типа. Это косвенно подтверждается значительным спадом за последние 15–20 лет как интенсивности появления новых инженерных решений, так и постепенным переходом этой области науки от обобщенно-фундаментальных исследований к узкоспециализированным прикладным.

Новая же волна фундаментальных исследований дробления и измельчения возможна только на основе глубокого анализа характера физических процессов с разработкой обобщенных многофакторных моделей процесса дезинтеграции, обладающих универсальностью, адаптируемых к большому числу аппаратов и позволяющих учесть до 20...30 входных параметров.

*Цель данной работы* – выявить применимость существующих методик теоретического описания процессов дезинтеграции полезных ископаемых к условиям производства, сформулировать направление дальнейшего развития исследований подготовительных процессов обогащения.

*Основная часть.* Трудность описания процесса дезинтеграции объясняется прежде всего многообразием конструкций технологических машин, обусловленного особенностями их назначения, которое может быть следующим:

- дробление и помол больших или малых потоков хрупких или пластичных материалов;
- переработка высокоабразивных материалов;
- селективное раскрытие минералов;
- улучшение технологических свойств продукта;
- обеспечение повышенных требований к чистоте химического состава продукта.

Кроме этого, актуальны проблемы соответствия конкретного измельчителя технологической схеме цепи обогатительных аппаратов, в том числе, сокращение стадийности подготовительных процессов обогащения.

*Таблица*

Группа факторов	Количество факторов
Размеры рабочего органа	2...3
Режим движения мелющих тел	1...3
Заполнения помольной камеры мелющими телами	1
Размер мелющих тел (дробящих кусков материала)	1...2
Параметры питания машины	2...3
Свойства исходного материала	2...5
Параметры футеровки	2
Способ разгрузки	2
Наличие циркулирующей нагрузки	1

Решение этих проблем зависит от обоснованности описания основных рабочих процессов машины:

- механики движения мелющих тел (кусков материала);
- механизма и режима разрушения частиц;
- вероятностных процессов захвата частиц дробящими поверхностями;
- классификации частиц внутри помольной камеры;
- износа рабочих поверхностей;
- влияния технологической среды.

Как следует из приведенной выше Таблицы, в зависимости от типа дробилки или измельчителя общее число факторов составляет примерно от 10 до 20...30, тогда как на сегодняшний день реально исследованы отдельно взятые группы по 2...5 факторов. Таким образом, очевидно отсутствие условий для полной оптимизации рабочего процесса даже в отдельно взятом технологическом аппарате.

В частности, известны многочисленные работы по механике движения мелющих тел (или дробящих кусков материала для мельниц самоизмельчения). Данными вопросами занимались такие ученые, как Э.В. Девис, Н.П. Неронов, В.А. Олевский, С.Е. Андреев, В.М. Осецкий, З.Б. Канторович, Р.Т. Хукки, А.М. Гау, Л.А. Вайсберг, Л.Б. Левенсон, А.И. Денисенко, В.И. Кармазин, Е.Е. Серго, А.Н. Марюта, Л.Ф. Биленко и др. [1–7].

Наибольшее количество трудов посвящено барабанным вращающимся мельницам – как шаровым и стержневым, так и самоизмельчения, потому что на их долю приходится преобладающие объемы перерабатываемых потоков материалов. Кроме того, из всех дробильно-измельчительных аппаратов указанные мельницы являются одними из самых сложных в описании внутренней механики благодаря наличию нескольких ее режимов – каскадного, водопадного и центрифугирования, которые сильно отличаются по способу движения мелющих тел (дробящих кусков материала), а также часто комбинируются друг с другом. Для "чистых" режимов установлены траектории движения мелющих тел, скорость их встречи, частота соударений и связанная с ними величина потребляемой мелющими телами "полезной" мощности в зависимости от степени заполнения барабана и его относительной частоты вращения. Однако, такой режим, как смешанный, в котором присутствуют элементы каскадного и водопадного режимов, уже фактически не поддается теоретическому описанию в рамках традиционных подходов и в настоящее время изучается на уровне эмпирических зависимостей. Работающее же в смешанном режиме основное количество мельниц имеет, поэтому, заниженные эксплуатационные характеристики по затратам полезной энергии и качеству выходного продукта. Последнее вообще никак не связывается аналитически с режимом работы машины, что, естественно, требует дальнейших исследований.

Вопросам износа рабочих поверхностей посвящены работы Э.В. Девиса, Ф. Бонда, К.А. Разумова, Д.К. Крюкова и др. [2, 8] Так, получены эмпирические зависимости скорости изнашивания шаров, что позволяет моделировать изменения состава шаровой загрузки с течением времени. Созданы профили футеровки, позволяющие минимизировать и сделать более равномерным ее износ.

Вместе с тем, износ рабочих деталей оказывает влияние на работу машины не только с точки зрения своевременности их пополнения или замены, но также может корректировать выбор режима работы, что относится к барабанным вращающимся, центробежным, вибрационным и некоторым другим типам измельчителей. Этот вопрос до настоящего времени незаслуженно мало исследован, подбор реального рабочего режима осуществляется в основном практическим путем. Теоретический анализ не дает ответа на вопрос о влиянии на процесс износа основных факторов, таких как твердость мелющих тел и измельчаемого материала, характер контактного взаимодействия и сопоставление эффекта повышения производительности мельницы (дробилки) за счет увеличения интенсивности взаимодействия изнашиваемых элементов и уменьшения срока службы последних. Тем более не проводится сравнение различных измельчителей, отличающихся принципиально, например, барабанной вращающейся и центробежной мельницы, по единым критериям энергоемкости и износа.

В основе любого элементарного акта дробления или измельчения лежит процесс разрушения отдельных кусков (частиц), для описания которого были созданы несколько теорий, связанных с процессом дробления, включая работы таких авторов, как П. Риттингер, Ф. Кик, Ф. Бонд, Р.Т. Хукке, П.А. Ребиндер, А.А. Гриффитс, В.И. Ревнивцев, Л.И. Барон, Р. Гийо и др. [9–15]. Основной целью является определение энергоемкости разрушения горных пород в зависимости от интенсивности и скорости приложения нагрузки, а также по мере уменьшения крупности частиц. Следует отметить полученные значения энергии разрушения в функции крупности, например, кривые Р.Т. Хукке, однако связать конечный результат с фундаментальными зависимостями физики разрушения на микроуровне фактически не удалось.

То же относится и к кривым, описывающим гранулометрический состав продуктов разрушения. Известные распределения Колмогорова, Годэна-Андреева, Розина-Раммлера и другие дают только общее понятие о виде кривой распределения, включают коэффициенты, определяемые для каждого случая опытным путем и слабо связанные с физикой процесса дезинтеграции отдельных частиц или их совокупностей [9, 16]. Некоторые распределения, например, полиномиальное Вейнига, опирается на сугубо математическую формулу, коэффициенты которой никак не связаны с физикой процессов, приведших к разрушению.

В результате, опора на кривые распределения, получаемые каждый раз эмпирическим путем, не позволяет объединить воедино теоретический анализ дезинтеграции отдельных кусков, распределение их продукта и перейти к вопросам кинетики измельчения.

Как следствие, существование чисто эмпирических кривых кинетики измельчения, которые разрабатывали В.В. Товаров, В.П. Ромадин, К.А. Разумов, С.Ф. Шинкоренко и др. [17–20]. В то же время, отдельные исследования, основанные на глубоком анализе физики процесса, например, формула Г.С. Ходакова, в качестве параметров распределения имеют такие величины, как плотность энергий предельных упругих и пластических деформаций, толщина пластически деформированного слоя на поверхности частиц [21], измерение которых в условиях производства представляет значительные трудности. Поэтому в настоящее время ни одну из предложенных формул зависимости крупности продукта разрушения от времени нельзя назвать в полном смысле теоретической кривой кинетики измельчения, пригодной для практического использования.

Таким образом, в практике дробления и измельчения фактически не используют количественное аналитическое описание внутренних процессов дезинтеграции, связанных как с движением мелющих тел, так и их воздействия на измельчаемый материал с целью прогнозирования технологической эффективности машины. Первой причиной, вероятно, является большое количество эмпирических коэффициентов в расчетных формулах, доходящее до 10, определить которые можно только в результате дорогостоящих и длительных экспериментов. Значительно проще определить параметры рационального рабочего режима опытным путем, что и происходит в действительности. Во-вторых, достичь максимальной технологической эффективности машины возможно только при использовании процедуры оптимизации с учетом всех входных параметров, число которых составляет не единицы, а десятки. Но без четких теоретических представлений весьма сложно и дорого установить взаимовлияние этих параметров на основе одних только опытных данных, в том числе благодаря накоплению погрешности измерений.

Поэтому единственная возможность перейти к управляемому процессу синтеза новых рабочих режимов дробильно-измельчительного оборудования и рациональных технологических схем подготовительных процессов обогащения – создание обобщенных методик оценки технологической эффективности машин для дезинтеграции на базе глубокого изучения физики всех внутренних процессов, начиная от движения мелющих тел и заканчивая распределением продукта на выходе из машины.

### *Выводы*

1. Основное количество существующих методик описания внутренних процессов в дробилках и мельницах основано на эмпирических зависимостях с

большим количеством неуниверсальных коэффициентов.

2. Необходима разработка универсальных обобщенных методик описания внутренних процессов на базе глубокого анализа их физической сущности.

3. Универсальные методики позволят проводить сравнение существенно различных дробилок и мельниц по заданным общим критериям и подбирать оптимальный аппарат для конкретной технологической схемы.

### Список литературы

1. Дэвис Э.В. Тонкое измельчение в шаровых мельницах // Сб. Механобра "Теория и практика дробления и тонкого измельчения". – 1932.
2. Олевский В.А. Размольное оборудование обогатительных фабрик. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 447 с.
3. Труды европейского совещания по измельчению. – М.: Стройиздат, 1966. – 603 с.
4. Вайсберг Л.А. Вибрационные дробилки. Основы расчета, проектирования и технологического применения / Л.А. Вайсберг, Л.П. Зарогатский, В.Я. Туркин. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. – 306 с.
5. Кармазин В.И., Денисенко А.И., Серго Е.Е. Бес шаровое измельчение руд. – М.: Недра, 1974. – 1984 с.
6. Марюта А.Н. Автоматизация процессов обогащения руд. – К.: Техника, 1962. – 140 с.
7. Биленко Л.Ф. Закономерности измельчения в барабанных мельницах. – М.: Недра, 1984. – 200 с.
8. Крюков Д.К. Футеровки шаровых мельниц. – М.: Машиностроение, 1965.
9. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980. – С. 127–134.
10. Бонд Ф.С. Законы дробления. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 195–208.
11. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур. – М.: Наука, 1966. – С. 3.
12. Ревнивцев В.И. Пути рациональной организации раскрытия минералов // Развитие теории, совершенствование техники и технологии, подготовка руд к обогащению /Межвед. Сб. науч. тр. "Механобр". – Л., 1982. – С. 3–8.
13. Барон Л.И., Хмельковский И.Е. Разрушаемость горных пород свободным ударом. – М.: Наука, 1971. – 203 с.
14. Гийо Р. Проблема измельчения материалов и ее развитие. – М.: Стройиздат, 1964. – 111 с.
15. Садовский М.А. О естественной кусковатости горных пород // ДАН СССР. – 1979. – Т.247. - №4. – С. 829–831.
16. Колмогоров А.Н. О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // ДАН СССР. – 1941. – Т.31, №2. – С. 99–101.
17. Товаров В.В. Модифицированные характеристики гранулометрического состава // Обогащение полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1981. – Вып. 28. – С. 7–11.
18. Ромадин В.П. Пылеприготовление. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1953. – 180 с.
19. Разумов К.А. и др. Закономерности измельчения в шаровых мельницах // Мат-лы VIII м.-н. конгресса по обогащению полезных ископаемых. – М., 1969. – Т. 1. – С. 111–114.
20. Шинкоренко С.Ф. Технология измельчения руд черных металлов. – М.: Недра, 1982. – 212 с.