



**МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**РЕДАКЦИОННЫЙ**

---

**С О В Е Т**

*Председатель*

**Л.А. ПУЧКОВ**

---

*Зам. председателя*

**Л.Х. ГИТИС**

---

*Члены редсовета*

**И.В. ДЕМЕНТЬЕВ**

---

**А.П. ДМИТРИЕВ**

---

**Б.А. КАРТОЗИЯ**

---

**М.В. КУРЛЕНЯ**

---

**В.И. ОСИПОВ**

---

**Э.М. СОКОЛОВ**

---

**К.Н. ТРУБЕЦКОЙ**

---

**В.В. ХРОНИН**

---

**В.А. ЧАНТУРИЯ**

---

**Е.И. ШЕМЯКИН**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

*ректор МГГУ,  
чл.-корр. РАН*

*директор  
Издательства МГГУ*

*академик РАЕН*

*академик РАЕН*

*академик РАЕН*

*академик РАН*

*академик РАН*

*академик МАН ВШ*

*академик РАН*

*профессор*

*академик РАН*

*академик РАН*

**А.А. Абрамов**

**ВЫСШЕЕ  
ГОРНОЕ  
ОБРАЗОВАНИЕ**

**ПЕРЕРАБОТКА,  
ОБОГАЩЕНИЕ  
И КОМПЛЕКСНОЕ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
ТВЕРДЫХ  
ПОЛЕЗНЫХ  
ИСКОПАЕМЫХ**

**Технология обогащения  
полезных ископаемых**

*Рекомендовано Министерством образования  
Российской Федерации в качестве учебника  
для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению «Горное дело»  
по специальности «Обогащение полезных  
ископаемых»*



**Москва  
Издательство Московского  
государственного горного университета  
2004**

**ТОМ II**

УДК 622.132.345:625

ББК 33.4

А 16

***Федеральная целевая программа «Культура России»***

*Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых. СанПиН 1.2.1253—03», утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г.*

**Рецензенты:**

- кафедра «Обогащение полезных ископаемых» Санкт-Петербургского государственного горного института (ТУ) (зав. кафедрой проф., д-р техн. наук *О.Н. Тихонов*);
- проф., д-р техн. наук *В.А. Бочаров* (кафедра «Обогащение руд цветных и редких металлов» Московского государственного института стали и сплавов)

**Абрамов А.А.**

А 16      Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых: Учебник для вузов. В 3 т. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. — Т. II. Технология обогащения полезных ископаемых. — 510 с.: ил. ISBN 5-7418-0242-7 (в пер.)

Рассмотрены технологические свойства полезных ископаемых, изложены основы теории обогатительных процессов, описано наиболее распространенное оборудование для их осуществления, показаны методы оптимизации и интенсификации технологических процессов обогащения, а также наиболее эффективные пути их совершенствования, дано обоснование наиболее эффективных технологических схем и режимов комплексной переработки и обогащения основных типов полезных ископаемых с учетом вещественного состава перерабатываемого сырья, рассмотрены возможности совершенствования системы управления качеством полезных ископаемых и рудоподготовки, повышения комплексности использования труднообогатимых руд и углей с применением комбинированных схем в условиях охраны окружающей среды. Приведены основные технико-экономические показатели обогащения по основным переделам, рассмотрены принципы организации производства и показатели работы обогатительных фабрик.

А.А. Абрамов — д-р техн. наук, профессор кафедры «Обогащение полезных ископаемых» Московского государственного горного университета.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению «Горное дело» по специальности «Обогащение полезных ископаемых». Может быть полезен инженерно-техническим работникам горно-обогатительных комбинатов, проектных и научно-исследовательских институтов.

Том I. «Обогатительные процессы и аппараты».

Том II. «Технология обогащения полезных ископаемых».

Том III. «Технология переработки и обогащения руд цветных металлов».

УДК 622.132.345:625

ББК 33.4

ISBN 5-7418-0242-7

© А.А. Абрамов, 2004

© Издательство МГГУ, 2004

© Дизайн книги. Издательство МГГУ, 2004

Современная технология переработки, обогащения и комплексного использования минерального сырья вплоть до безотходной технологии в горно-обогатительном производстве основана на применении методов обогащения полезных ископаемых, использующих различия в физических, магнитных, электрических, физико-химических и других свойствах разделяемых минералов. Эти методы позволяют также при грамотном их применении эффективно решать экологические проблемы горного производства: переработки и использования вскрышных пород, накопившихся отходов, вторичного сырья, кондиционирования оборотных, очистки сточных вод и т. д.

К настоящему времени сформированы новые представления в области теории и технологии обогащения полезных ископаемых, созданы более совершенные техника и технология, новые методы комплексной их переработки с учетом охраны окружающей среды. При написании учебника они учтены при анализе мировой практики работы передовых предприятий и обосновании наиболее эффективных технологических схем и решений переработки различных типов минерального сырья.

Назначение учебника — дать студентам горных специальностей необходимые знания технологических свойств полезных ископаемых, основ теории обогатительных процессов и конструкций наиболее распространенного оборудования для их осуществления, ознакомить с современной технологией комплексной переработки и обогащения основных типов полезных ископаемых, технико-экономическими показателями переработки и обогащения различных типов минерального сырья, создать необходимую основу для творческого решения будущими горными инженерами вопросов оптимального совмещения технологических процессов добычи и обогащения, повышения комплексности использования сырья, технологи-

ческих, экономических и экологических показателей переработки и обогащения полезных ископаемых.

Учебник состоит из шести частей в двух томах и содержит все разделы, необходимые для решения перечисленных выше задач.

Том I «Обогатительные процессы и аппараты» включает в себя первые четыре части.

В первой части рассмотрены технологические свойства полезных ископаемых и минералов, на различии которых и основаны методы разделения минералов при переработке и обогащении полезных ископаемых. Дана классификация процессов, схем обогащения и рассмотрены методы оценки показателей обогащения и комплексности использования сырья. Приведенные материалы составляют базу для обоснованного выбора наиболее эффективных методов обогащения каждого конкретного вида полезного ископаемого с учетом особенностей вещественного состава и технологических свойств составляющих его минералов.

Во второй части, учитывая важное технологическое и технико-экономическое значение подготовки полезных ископаемых к обогащению, рассмотрены процессы грохочения, классификации, дробления, измельчения полезных ископаемых и термохимические процессы, совершенно необходимые при переработке труднообогатимых руд.

Совокупность приводимых материалов призвана обеспечить создание необходимых предпосылок для выявления и обоснования в каждом конкретном случае наиболее целесообразной комбинации процессов для подготовки полезных ископаемых к обогащению.

В третьей и четвертой частях рассмотрены современные основные и вспомогательные методы комплексной переработки и обогащения полезных ископаемых. Изложены основы теории процессов и приведено основное оборудование для их осуществления, позволяющие сформировать

подход к оценке и использованию прогрессивных технологических процессов обогащения и комплексной переработки минерального сырья.

Том II «Технология обогащения полезных ископаемых» состоит из двух частей.

В первой части рассмотрена современная технология переработки и обогащения основных типов полезных ископаемых на фабриках СНГ и зарубежных стран с учетом вещественного состава перерабатываемого сырья, необходимости комплексного его использования и путей решения экологических проблем. Она базируется на результатах анализа мировой практики работы передовых предприятий, современных тенденциях совершенствования техники и технологии обогащения различных типов минерального сырья, результатах современных исследований обогатительных процессов.

Знание современной технологии горным инженерам позволит: понимать логическую связь и взаимозависимость технологических переделов добычи и обогащения полезных ископаемых и использовать их для совершенствования своего технологического передела, знать возможности взаимосвязанных технологических переделов и грамотно решать задачи управления качеством руд и россыпей в горном цехе и в процессе подготовки их к обогащению; знать возможности процессов и технологии обогащения и грамотно решать задачи переработки руд, углей, россыпей, твердых отходов, кондиционирования оборотных и очистки сточных вод, обеспыливания; получить за счет комплексного использования сырья максимальную прибыль в рамках горно-обогатительного комбината при соблюдении современных требований по экологии.

Во второй части рассмотрены современная организация производства, системы контроля и управления технологическими процессами с применением современных средств и вычислительной техники; приведены показатели обогащения на обогатительных фабриках и показаны перспективы развития

техники и технологии комплексной переработки и обогащения руд на горно-обогатительных предприятиях, наиболее эффективные пути совершенствования технологических процессов обогащения полезных ископаемых.

Автор благодарен докторам технических наук, профессорам С.Б. Леонову, В.А. Бочарову и коллективу кафедры «Обогащение полезных ископаемых» Московского государственного горного университета за ценные советы, критические замечания и указания, которые помогли улучшить настоящее издание.

Автор выражает искреннюю благодарность совету директоров ОАО «Казцинк» Республики Казахстан за консультации по вопросам практики обогащения полиметаллических руд и оказание спонсорской помощи при подготовке к изданию данной книги.



# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ И РЕЖИМЫ ПЕРЕРАБОТКИ И ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

## *Глава 1*

Полезные ископаемые и общая характеристика технологии их переработки и обогащения

## *Глава 2*

Технология подготовки полезных ископаемых к обогащению

## *Глава 3*

Технологические схемы и режимы обогащения руд цветных металлов

## *Глава 4*

Технологические схемы и режимы обогащения руд и россыпей редких, редкоземельных и радиоактивных металлов

## *Глава 5*

Технологические схемы и режимы обогащения золотосодержащих руд и россыпей

## *Глава 6*

Технологические схемы и режимы обогащения руд черных металлов

## *Глава 7*

Технологические схемы и режимы обогащения горно-химического сырья

## *Глава 8*

Технологические схемы и режимы обогащения алмазосодержащих руд и песков

## *Глава 9*

Технологические схемы и режимы обогащения неметаллических полезных ископаемых и индустриального сырья

## *Глава 10*

Технология переработки и обогащения строительных горных пород и материалов

## *Глава 11*

Технология переработки и обогащения углей и сланцев (энергетического сырья)

# ЧАСТЬ 1

## **1.1. Полезные ископаемые и их месторождения**

### **1.1.1. Классификация полезных ископаемых**

Классификация основных типов полезных ископаемых, принятая в странах СНГ, включает:

- *угли и горючие сланцы*: коксующиеся, энергетические и бурые угли, горючие сланцы;
- *руды цветных металлов*, содержащие медь, свинец, цинк, никель, алюминий, кобальт, кадмий, ртуть, висмут, сурьму, мышьяк;
- *руды и россыпи редких металлов*, содержащие:
  - легкие редкие металлы — литий, рубидий, цезий, бериллий;
  - тяжелые редкие металлы — вольфрам, молибден, тантал, ниобий, титан, цирконий, ванадий, олово;
  - редкоземельные металлы — скандий, иттрий, лантан и лантаниды (14 элементов — от церия до лутетия);
  - рассеянные редкие металлы — галлий, индий, таллий, германий, гафний, селен, теллур, рений;
  - радиоактивные металлы — радий, актиний и актиниды (торий, протактиний, уран и элементы 93—102 таблицы Менделеева), полоний;
- *руды черных металлов*, содержащие железо, хром или марганец;
- *руды и россыпи благородных металлов*, содержащие золото, серебро или платину и платиноиды (осмий, иридий, рутений, родий, палладий);

- *руды и россыпи, содержащие драгоценные камни: алмазы, рубины, изумруды;*
- *горно-химическое сырье, содержащее фосфаты, бор, серу или калийные соли;*
- *неметаллические полезные ископаемые, содержащие барит, флюорит, магнезит, кальцит, доломит и другие подобные минералы;*
- *индустриальное сырье, содержащее кварц, полевошпат, слюду, графит, асбест, тальк, глину, мел и т. д.;*
- *строительные горные породы, содержащие известняк, кварцит, гравий, песок и т. д.*

### **1.1.2. Общая характеристика месторождений полезных ископаемых**

Полезные ископаемые обладают рядом характерных особенностей, которые определяют не только выбор технологии их переработки и обогащения, но и технологию разработки месторождений. К основным из них относятся следующие.

***Комплексность сырья.*** В рудах и россыпях, наряду с основными металлами или минералами, имеются и другие ценные компоненты. Благородные металлы и примеси ценных компонентов присутствуют в рудах главным образом в виде изоморфных смесей и тонкодисперсных включений в минералы основных и сопутствующих полезных компонентов, таких, как, например, молибденит, барит, пирит и др. Несульфидные минералы представлены оксидами, силикатами, карбонатами, фосфатами и другими породными минералами в различном их соотношении. Существующий уровень технологии переработки и обогащения руд позволяет осуществить практически безотходное производство, однако возможность организации его на практике зависит также от экономических, географических, политических и других факторов, действующих в регионе.

***Низкое содержание цветных, редких и благородных металлов в рудах.*** Среднее содержание меди, например, в медно-порфириновых рудах в настоящее время составляет около 0,9 %, в медистых песчаниках — 3,5 %, в медно-колчеданных рудах — 1,4 %. В этих же пределах изменяются средние содержания свинца, никеля и цинка. Содержания сопутствующих метал-

лов при этом оцениваются обычно сотыми и тысячными долями процента.

По содержанию металлов руды условно делят на богатые, бедные и забалансовые (непромышленные), границы между которыми определяются состоянием техники и технологии обогащения, экономическими интересами и потребностями государства в производстве металлов.

***Тонкая дисперсная связь ценных компонентов с вмещающими горными породами и между собой.*** По крупности вкрапленности различают руды: крупновкрапленные (размер включений извлекаемых минералов более 0,4 мм); средней вкрапленности (0,15—0,4 мм) и тонковкрапленные (меньше 0,15 мм). По характеру вкрапленности различают равномерно-вкрапленные, неравномерно-вкрапленные руды и руды с агрегатной вкрапленностью минералов. Различный характер минерализации перерабатываемых руд требует разработки более совершенной технологии рудоподготовки, применения более сложных, стадийных схем обогащения.

***Сложность и изменчивость вещественного состава руд и россыпей.*** Руды и россыпи весьма разнообразны и изменчивы по химическому и минеральному составу, характеру вкрапленности и текстурно-структурным особенностям, степени окисленности, крепости, дробимости, измельчаемости, обогатимости.

Различные сочетания свойств руд и россыпей создают большое многообразие их типов и разновидностей, отличающихся между собой важными технологическими свойствами по отношению к процессам дробления, измельчения, обогащения и др. Поэтому технологические типы и сорта руд и россыпей на каждой обогатительной фабрике определяют по результатам специально проведенных технологических испытаний.

***Сложные горно-технологические условия залегания в недрах рудных месторождений.*** Месторождения полезных ископаемых отличаются сложностью морфологии и разобщенностью рудных тел, весьма крепкими рудами и вмещающими породами, определяющими большую трудоемкость при их разработке. Разнообразии наблюдаемых при этом структур и текстур сопровож-

дается резкими изменениями физико-механических свойств руды. Руды считают мягкими, если коэффициент их крепости по шкале М.М. Протодьяконова не превышает 10, средними — 10—14, твердыми — 14—18, весьма твердыми — более 18. При этом средневзвешенный показатель абразивности составляет, мг: для мягких руд — до 10; для средних — 10—30; для твердых — 30—45 и для весьма твердых — более 45.

Разработка месторождений осложняется необходимостью выдачи руд по технологическим сортам. Промышленные типы руд выделяют по содержанию в них основных и сопутствующих компонентов, а также по форме рудных тел и генезису. Дальнейшее дифференцирование руд до технологических сортов, как объектов обогащения, осуществляют путем выделения подтипов и разновидностей их по степени окисленности, крупности и характеру вкрапленности рудных минералов, крепости, текстурно-структурным особенностям и другим признакам на основании результатов технологического картирования месторождения. Число технологических сортов определяет выбор способа вскрытия месторождения и системы его разработки.

Основная тенденция, характеризующая положение с сырьевой базой, — обеднение руд и россыпей, уменьшение крупности и усложнение характера вкрапленности ценных компонентов, увеличение степени окисления и ухудшение обогатимости руд. В эксплуатацию вовлекаются все более бедные и труднообогатимые руды. Например, среди колчеданных медно-цинковых руд России и Казахстана доля труднообогатимых руд уже сейчас достигает 70—75 %.

Качественному ухудшению сырьевой базы и значительному увеличению требуемых капиталовложений при неминуемом росте стоимости извлекаемых из руд и россыпей металлов пытаются противопоставить:

- максимально возможное увеличение объема добычи и переработки руды на каждом вновь вводимом или расширяемом (за счет новых участков) месторождении, чтобы снизить удельные капитальные затраты и эксплуатационные расходы на каждую тонну перерабатываемой руды. Для этого ведется интенсивная разработка все бо-

лее крупного и высокопроизводительного горно-транспортного и обогащительного оборудования (экскаваторов, автосамосвалов, дробилок, мельниц, флотационных машин и др.). Производственная мощность некоторых медных горно-обогащительных предприятий составляет около 100 тыс. т/сут («Сиеррита», «Бугенвиль» и др.); проектируют и строят еще более мощные предприятия (до 150—170 тыс. т/сут) на базе месторождений «Серро Королано» (Испания) и «Тенке-Фунгуруме» (Заир);

- новые технологические решения по рудоподготовке и обогащению руд, более экономичные проектные и инженерные решения как в комплексе рудник — фабрика, так и в комплексе рудник — фабрика — металлургический завод, чтобы снизить удельные затраты на добычу и переработку руды, повысить комплексность ее использования и тем самым прибыль предприятия;
- максимальное сокращение сроков разведки месторождений, проектирования, строительства и пуска горно-обогащительных предприятий с целью сокращения материальных затрат и быстрой окупаемости капиталовложений.

## **1.2. Технологические процессы добычи, переработки и обогащения полезных ископаемых**

### **1.2.1. Добыча полезных ископаемых**

Месторождения, размещенные относительно близко к земной поверхности, разрабатывают открытым способом; месторождения, размещенные на значительной глубине, — подземным способом. В настоящее время глубина открытых разработок (карьеров) составляет 150—300 м, на отдельных месторождениях она достигает 600 м и более. Подземные горные работы ведут в среднем на глубине 500 м, на отдельных рудниках — на глубине 800—1000 м. С переходом на более глубокие горизонты горно-технические условия производства горных работ резко усложняются, производитель-

ность оборудования снижается, себестоимость добытой руды повышается.

Преимущественное развитие получил открытый способ добычи полезных ископаемых, которому свойственны более низкие потери и разубоживание добываемых руд и углей, чем при подземном способе, более низкая себестоимость, более высокая производительность и благоприятные условия труда. При прочих равных условиях в первую очередь в эксплуатацию вводят месторождения, позволяющие вести разработку их открытым способом.

Несмотря на преимущественное развитие открытого способа разработки, абсолютный объем добычи на подземных рудниках и шахтах также непрерывно возрастает в связи с необходимостью вовлечения в эксплуатацию месторождений, залегающих на больших глубинах. При этом все большее развитие получают три основные технологические системы разработки: с использованием самоходного оборудования; с поточным ведением работ, основанные на применении комплексов вибрационных механизмов непрерывного действия; с твердеющей закладкой выработанного пространства.

Важнейшее направление повышения производительности труда в условиях глубоких карьеров — переход на циклично-поточную технологию ведения горных работ, в том числе и при селективной выемке руды на добычных уступах. Интенсификация процессов добычи полезных ископаемых посредством применения гранулированных взрывчатых веществ в сочетании с комплексной механизацией зарядания шпуров и скважин осуществляется с учетом необходимости максимального разупрочнения горной массы при взрыве. Лучшие результаты достигаются при учете стратиграфических особенностей залегания рудных тел, оптимальном содержании газообразующих компонентов во взрывчатом веществе, соответствующем расположении взрывных скважин и расходе взрывчатого вещества. Рудник (шахта) или карьер входит составной частью в единую систему управления качеством руд комплекса горный цех — обогатительная фабрика.

## **1.2.2. Подготовка полезных ископаемых к переработке и обогащению**

*Необходимая крупность продуктов и требования к процессам дробления и измельчения.* Эффективность процесса обогащения зависит от того, насколько полно в результате дробления, грохочения, измельчения и классификации удалось обеспечить отделение (раскрытие) извлекаемых минералов и преимущественное распределение их зерен по тем классам крупности, извлечение из которых гравитационными, флотационными и другими методами происходит наиболее полно.

В большинстве случаев не удастся достигнуть полного раскрытия всех сростков, представленных обычно сростками зерен соизмеримых размеров, пленками одного минерала на поверхности зерен другого, эмульсионными включениями или жилками одного минерала в другом и другими более сложными формами срастания минералов. При обогащении приходится отделять частицы, более насыщенные включениями извлекаемого минерала, от менее насыщенных ими зерен. Поэтому каждая руда, например, имеет свою экономически выгодную степень измельчения. Чем выше содержание полезных минералов в руде, больше производственная мощность фабрики и крупнее вкрапленность извлекаемых минералов, тем желательнее более полное раскрытие сростков.

Для повышения эффективности измельчения и селективности раскрытия сростков минералов применяют реагенты-диспергаторы: полимерные неорганические (полифосфаты, полисиликаты) и органические (полиакрилаты) соли щелочных металлов, дипольные органические соединения (алканамины). Механизм влияния реагентов заключается в изменении реологических свойств пульпы, воздействии на трещинообразование, флокулирование или диспергирование частиц, эффективность классификации.

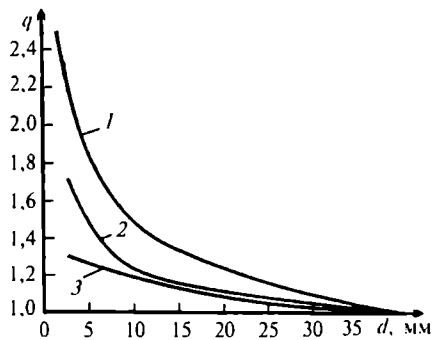
Для повышения эффективности раскрытия сростков исследуют также нетрадиционные способы измельчения, например, термическая декрипитация, измельчение мощным электрическим импульсом, обеспечивающим раскрытие сростков по плоскостям срастания минералов. Недостаток таких методов заключается в сложности и дороговизне оборудования.



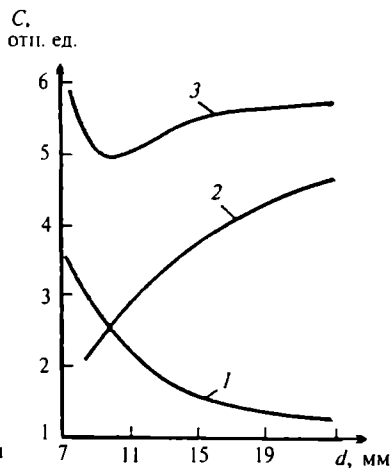
В условиях постоянного снижения содержания металлов в рудах и необходимости их более тонкого измельчения значение экономических факторов при рудоподготовке резко возрастает, поскольку доля дробления и измельчения в себестоимости обогащения руд составляет 65—70 %. При этом обязательными требованиями к процессам, оборудованию и схемам рудоподготовки являются: тщательный учет особенностей вещественного состава руды с целью выбора наиболее эффективного оборудования и предотвращения переизмельчения материала; осуществление нескольких технологических операций в одном агрегате высокой производительности при высокой степени сокращения крупности материала; обеспечение минимальных энергетических и материальных затрат; высокая надежность и износоустойчивость оборудования; возможность автоматизации, улучшения условий труда и охраны окружающей среды.

**Сравнительная характеристика дробильно-измельчительного оборудования.** Учитывая решающее влияние на снижение капитальных затрат, эксплуатационных расходов и повышение производительности труда увеличения размеров и мощности дробильно-измельчительного оборудования, к настоящему времени освоен ряд новых машин и аппаратов, характеризующихся большой удельной производительностью и высокими технологическими показателями. Среди них конусные дробилки (эксцентрикковые) диаметром 2900 мм для крупного дробления, диаметром 3000 мм для среднего и мелкого дробления (производительностью до 10—12 млн т/год одной стандартной и до 5—6 млн т/год одной короткоконусной дробилки), дробилки типа «Жиродиск» для получения дробленого продукта крупностью -10 мм, инерционные дробилки типа КИД, обеспечивающие дробление материала от 90—100 до 8—12 мм, шаровые мельницы диаметром 6 и 7 м и мельницы для мокрого само- и полусамоизмельчения диаметром 10,5—13 м.

Наилучшие показатели по производительности имеют крупные конусные (эксцентрикковые) и роторные дробилки (3000 т/ч), барабанные мельницы (стержневые, шаровые, самоизмельчения), обеспечивающие переработку одним агрегатом



**Рис. 1.1.** Зависимость относительной производительности  $q$  шаровых мельниц от крупности исходного материала  $d$  для медных порфириновых руд: 1 — общее увеличение производительности; 2 — увеличение производительности за счет образования готового продукта при дроблении; 3 — увеличение производительности за счет повышения эффективности измельчения



**Рис. 1.2.** Влияние крупности дробленого продукта  $d$  на относительную стоимость  $C$  дробления (1), измельчения (2) и общую стоимость дробления и измельчения (3) (по данным В. К. Захваткина)

около 300 т/ч руды. Агрегаты взрывоструйного измельчения имеют производительность до 50 т/ч, струйные мельницы — до 5 т/ч. Валковые дробилки используют при переработке липких руд, ударные — для дробления неабразивных руд.

Производительность дробилок и мельниц при снижении крупности дробленого или измельченного продукта уменьшается, шаровых мельниц — возрастает с уменьшением крупности исходного материала (рис. 1.1 и 1.2).

При стадийном дроблении и измельчении стальной средой энергозатраты минимальны.

С уменьшением крупности дробленой руды производительность шаровых мельниц растет и стоимость измельчения уменьшается, но затраты на дробление повышаются. При определенной (оптимальной) крупности дробленой руды суммарные расходы на дробление и измельчение будут минимальными. Наивыгоднейшая в экономическом отношении крупность продукта сухого дробления для измельчения его в

шаровых мельницах зависит от производственной мощности фабрики.

Производственная мощность фабрики, тыс. т/сут .....	0,5	2,5	10	40
Крупность дробленого продукта, мм .....	10—15	6—12	5—10	4—8

Переход на самоизмельчение сопровождается повышением энергозатрат примерно на 10 %. Однако использование мельниц самоизмельчения позволяет заменить две стадии дробления и одну-две стадии измельчения стальной средой и за счет этого снизить эксплуатационные и капитальные затраты на 8—10 %, повысить производительность труда на 10 % при сокращении крупности материала от 300 (400) до 0,3 мм.

Степень сокращения крупности материала при самоизмельчении превышает 1000, тогда как при взрывоструйном измельчении она составляет 500, при измельчении в шаровых и рудно-галечных мельницах — около 100, при дроблении в роторных и инерционных дробилках — 18—20. Однако процесс самоизмельчения может быть использован для руд лишь с определенными физико-механическими свойствами. Замена шарового измельчения паро- или газоструйным измельчением вызывает увеличение энергозатрат в 1,2—1,5 раза, центробежным измельчением — в 2 раза, электрогидравлическим дроблением — в 3—4 раза.

Износ металла, футеровок и измельчающей среды при использовании шаровых мельниц составляет 1,5—1,7 кг/т, а при использовании вибрационных и планетарных мельниц — до 1,8—2 кг/т. При использовании высококачественных шаров твердостью 700 НВ и равномерной структурой по всему сечению (фирм «Армко», Италия и «Хелипекс», Великобритания) их расход снижается в 3—4 раза. Минимальный износ (100—200 г/т) имеют мельницы самоизмельчения, струйные и взрывоструйные аппараты.

Наиболее высокий коэффициент движения (0,92—0,96) имеют шаровые и рудно-галечные мельницы. Для мельниц самоизмельчения коэффициент движения составляет 0,87—0,89,

а для мельниц самоизмельчения, работающих с добавками шаров, и струйных мельниц — 0,8—0,85.

Производительность труда уменьшается при переходе от одного вида рудоподготовки к другому в следующем порядке: самоизмельчение, стадияльное дробление и измельчение стальной средой, взрывоструйное и струйное измельчение, вибрационное измельчение, электрогидравлическое дробление, центробежное измельчение.

По совокупности характеристик современному уровню требований наиболее отвечают: самоизмельчение (в том числе первичное, вторичное и взрывоструйное самоизмельчение) и стандартные способы рудоподготовки, включающие стадияльное дробление в эксцентриковых дробилках до –12 (20) мм и измельчение в крупных шаровых мельницах. В соответствии с этим наиболее широкое развитие и применение на обогатительных фабриках получили три основных технологических направления подготовки руд к обогащению:

- стадияльное дробление и измельчение стальной средой;
- стадияльное дробление и рудно-галечное измельчение;
- одностадияльное первичное дробление и рудное самоизмельчение до конечной или промежуточной крупности, дополняемое в последнем случае шаровым или рудно-галечным измельчением.

***Повышение эффективности работы дробильно-измельчительного оборудования.*** Эффективность работы дробильного оборудования повышается посредством увеличения частоты качаний дробящего конуса, создания распределителей питания дробилок мелкого дробления, совершенствования профиля дробящей камеры, механизации ремонта и обслуживания дробилок, автоматического управления их работой. Процесс дробления в дробящей камере многих конусных дробилок происходит неэффективно. Объясняется это несогласованностью размеров приемных отверстий, объемов зон дробления рабочей полости дробилок, крупности и массы продукта, поступающего в зону на дробление. На практике это приводит к неравномерной загрузке дробилок по стадиям, местному износу футеровок конусов и значительному отходу (50—70 %) их в металлический лом. Профилирование рабочей камеры

дробилок в зависимости от крупности исходного и дробленого продуктов, требуемой переработки, с учетом рациональной загрузки дробилок по стадиям, и равномерное питание исходным продуктом дробящего пространства дробилок обеспечивают повышение производительности каскада дробилок на 15—20 % с одновременным снижением крупности готового продукта на 20 %, расхода брони на 30 % и электроэнергии на 20 %.

Совершенствование схем и способов *самоизмельчения* осуществляется догрузкой шаров в количестве 5—8 % объема мельницы, выведением из цикла классов критической крупности и использованием их в качестве измельчающей среды при рудно-галечном измельчении, додрабливанием этих классов в конусных дробилках. Оснащение мельниц больших размеров тихоходными низкочастотными синхронными электродвигателями позволяет снизить капитальные затраты на строительство систем электроснабжения и за счет отсутствия редукторов и других передач увеличить КПД установки на 6—8 %, а также обеспечить оптимальную частоту вращения барабана мельницы, составляющую 70—75 % критической при степени заполнения барабана 38—42 %.

Максимальная производительность мельниц рудного самоизмельчения достигается при поддержании в них объема измельчающей среды, составляющей от 25—30 % объема коротких мельниц до 40—45 % объема длинных.

При содержании в руде глинистого материала до 10 % ее целесообразно подвергнуть промывке с целью повышения эффективности процесса самоизмельчения и производительности мельниц. При высоком содержании вязкой глины отмывка необязательна, так как в процессе самоизмельчения происходят наиболее интенсивная дезинтеграция и эффективное отделение глинистых частиц от кристаллических пород.

Мокрое самоизмельчение может сопровождаться применением гравитационных методов обогащения в замкнутом цикле измельчения с выделением сравнительно крупных хвостов и получением рудной гали для вторичного измельчения.

Основное условие, обеспечивающее наибольшую эффективность рудно-галечного измельчения руды, — ускорение разгрузки из мельниц измельченного материала и уменьше-

ние времени нахождения циркулирующей нагрузки в процессе, что достигается обычно заменой классификаторов на соответствующие грохоты в замкнутом цикле измельчения.

Повышение удельной производительности установленных на фабрике шаровых и стержневых мельниц достигается обычно за счет максимально возможного снижения крупности их питания, повышения пропускной способности, выявления оптимальной частоты вращения мельниц и оптимальной рационализованной загрузки их измельчающими телами, определения оптимальных размеров догружаемых шаров и целесообразности химических добавок — понизителей прочности материала. Так, уменьшение крупности дробленной руды от 40—50 до 20 мм, применение шаровых мельниц с широкой горловиной и секторной спиралью, уменьшение диаметра дробящих тел, рационализованная загрузка шаров, удлинение барабанов стержневых и шаровых мельниц на 700 мм, внедрение системы автоматического поддержания постоянства питания мельниц рудой привели к повышению производительности Балхашской фабрики на 75 % и извлечения меди на 0,8 %.

Увеличение степени раскрытия полезных минералов при минимальном переизмельчении их свободных зерен и минералов породы достигается на фабриках в результате:

- перевода шаровых мельниц на некатарактный режим работы при доизмельчении промпродуктов и коллективных концентратов;
- установки флотоклассификаторов, монокамер, флотоотсадочных машин, гравитационных аппаратов в замкнутых циклах измельчения, осуществления флотации песков гидроциклона в машинах типа «Ским Эйр» с целью вывода из процесса раскрытых зерен полезных минералов;
- применения более эффективных классифицирующих аппаратов, например, гидроциклонов или гидроосцилляторов, имеющих более высокую эффективность классификации (в 2 раза), производительность по сливу (в 3—3,5 раза) и занимающих меньшую площадь (в 2—2,5 раза).

**Совершенствование техники и технологии грохочения и классификации в циклах дробления и измельчения.** В настоящее время в промышленности широко применяют вибрационные

грохоты с просеивающей поверхностью площадью от 10 до 24 м<sup>2</sup>; созданы вибрационные грохоты для грохочения влажных и глинистых материалов. Наиболее простой и эффективный путь интенсификации *процесса грохочения* — применение просеивающих поверхностей из эластомеров. Использование резиновых карт, резонирующих ленточно-струнных сит, армированных резиновых карт позволяет повысить удельные показатели серийно выпускаемых вибрационных грохотов без изменения их динамических режимов в среднем в 1,5—1,6 раза, а в отдельных случаях — до 1,8—2 раза.

Характерная особенность *циклов измельчения* современных фабрик — почти полное упразднение механических классификаторов и широкое использование гидроциклонов, размеры которых с целью сохранения высокой эффективности классификации независимо от производительности фабрики не превышают 500—750 мм, а в цикле доизмельчения концентратов и промпродуктов — 250—350 мм. Совершенствование конструкции гидроциклонов (например, за счет спирального ввода питания) и расширение ассортимента новых видов износостойких материалов (керамика, специальные резины, полиуретаны и др.), применение насосов с регулируемой частотой вращения и систем автоматизации позволяют значительно увеличить сроки службы гидроциклонов и технологические показатели их работы.

Для улучшения *классификации* в циклах измельчения рекомендуется:

- применять несколько гидроциклонов, установленных параллельно;
- использовать для питания гидроциклонов насосы с регулированием числа их оборотов;
- применять дуговые грохоты и гидроциклоны для повторной классификации пескового продукта первичных гидроциклонов с целью уменьшения содержания в этом продукте зерен флотационной крупности и их переизмельчения.

Классификацию слива мельниц рудного самоизмельчения (при измельчении до промежуточной крупности) часто осуществляют на вибрационных и других грохотах, работающих

последовательно (фабрика «Лима»). Причем в циклах одностадиального рудного самоизмельчения устанавливают песковые насосы с автоматически регулируемой частотой вращения.

*Грохоты тонкого грохочения*, применяемые в качестве классифицирующих аппаратов, позволяют снизить ошламование полезных минералов, повысить точность разделения материала по крупности, обеспечить максимальный выход продуктивных классов крупности и за счет этого улучшить качественные и количественные показатели как измельчительных циклов, так и обогатительных операций. Все большее распространение получают грохоты «Могенсен» и дуговые грохоты (типа «Бартлес-СТ», ДСМ и «Рэпифайн»), обладающие более высокой эффективностью и меньшим забиванием ситовых отверстий (по сравнению со щелевыми), а также отдельные конструкции высокочастотных грохотов (фирм «Дорнер и Ревум», «Нейшнл Инжиниринг», США), производительность которых в 4—5 раз превышает производительность обычных грохотов.

Иногда для классификации применяют вертикальные грохоты (например, фирмы «Биндер», США), имеющие большую производительность при полном отсутствии забивания сита. Грохочение как операция классификации во II и III стадиях измельчения, а также в циклах доизмельчения при разделении по крупности 0,5—0,2 мм может быть успешно осуществлено на гидравлических грохотах стационарного типа с периодическим встряхиванием сита (ГППГ-0,75 и 299ГрА, Россия). В первом из них использовано плоское сито, во втором — дуговое с центральным углом 30°. Наилучшие показатели грохочения на полиметаллических рудах получены при массовой доле твердого в питании грохота 30—40 %. Отличие гидравлических грохотов с эластичной синтетической сеткой — отсутствие каких-либо специальных устройств для очистки сита. Высокие эксплуатационные показатели их работы достигаются за счет применения в качестве просеивающей поверхности тканей сетки из синтетической мононити, обладающей высокой эластичностью и живым сечением более 50 %, а также оригинальной конструкцией грохота, обеспечивающей быструю замену сетки. Достоинство гидравлических



грохотов — возможность эффективного грохочения довольно плотных пульп с массовой долей твердого в питании до 60—65 %.

Для разделения продуктов обогащения на классы, требующие отдельной переработки, перспективны вибрационные грохоты с ситом, колеблющимся в водной среде (ГВП, Россия).

**Повышение износостойкости оборудования.** Для увеличения срока службы сит грохотов (в 10—30 раз) успешно применяют резиновые покрытия (например, из абразивостойкого полиуретана или полиуретановых каучуков) и резиновые сита шведских фирм «Треллеборг» и «Скега». Износостойкость футеровок спиралей классификаторов повышают за счет применения резины, полиуретана, специальных чугунов и других износостойких сплавов и материалов. Материалом насадок гидроциклонов является обычно карбид кремния.

Для футеровки барабанов мельниц на многих фабриках нашли применение металлические футеровки унифицированного типа, износостойкость которых выше обычных (волновых, клиновых и др.) в 1,3—1,5 раза. Для мельниц первой стадии измельчения с учетом кинетики измельчения материала и движения в них шаров разработаны футеровки ступенчатого типа. Промышленная проверка их на мельницах размером 3,2 × 3,8 м показала возможность повышения износостойкости по сравнению с унифицированными в 1,5 раза с одновременным повышением производительности и снижением энергозатрат на 5—7 % по готовому классу. Получено несколько новых сплавов для футеровки мельниц («Бофорс», «Параболлой» и др.), срок службы которых в 2—3 раза превышает срок службы чугуна «Нихард».

Опыт эксплуатации резиновых футеровок показал целесообразность их применения на рудоразмольных мельницах второй и последующих стадий измельчения диаметром до 4 м с мелющими телами менее 80 мм и частотой вращения не более 80 % критической. Температура не должна превышать 80 °С, а рН — выходить за пределы 5—12. Резиновые футеровки обеспечивают увеличение срока их службы по сравнению с металлическими в 1,2—3,9 раза, уменьшение массы фу-

теровки в 5—6 раз, значительное снижение шума (в 2—3 раза при мокром и в 5—7 раз при сухом измельчении), снижение затрат труда при перефутеровках на 30—50 %, исключение газосварочных работ и безопасные условия труда.

### **1.2.3. Переработка и обогащение полезных ископаемых**

*Методы и основные направления развития технологии обогащения полезных ископаемых.* Используя различия минералов по плотности, магнитным свойствам, способности к люминесценции и т. д., в результате обогащения получают товарные концентраты и продукты, содержание ценных компонентов и вредных примесей в которых в значительной мере зависит от химического состава извлекаемых в них минералов и от характера их прорастания с другими минералами. Необходимость повышения качества концентратов и извлечения в них ценных компонентов, комплексности использования сырья и улучшения охраны окружающей среды требует дальнейшего совершенствования методов, техники и технологии переработки и обогащения руд и россыпей.

К основным направлениям развития технологии обогащения полезных ископаемых относятся:

- расширение области применения методов предварительной концентрации руд с использованием процессов обогащения в тяжелых средах, отсадки и радиометрических методов обогащения (рентгенорадиометрической, рентгенолюминесцентной, радиорезонансной, гамма-абсорбционной, фотометрической сортировки и др.) с учетом совершенствования схем рудоподготовки, обеспечивающих наиболее экономически выгодное соотношение крупности продуктов дробления и измельчения;
- применение в процессе обогащения новых, более эффективных режимов обогащения и способов интенсификации технологических процессов, а также стадийных схем обогащения;
- разработка и широкое распространение комбинированных схем, включающих или различные методы обогащения, или сочетание методов обогащения с методами

пиро- и гидрометаллургии (особенно с операциями экстракционного и сорбционного извлечения металлов из руд и растворов, а также биологического выщелачивания металлов);

- разработка и внедрение нового, более производительного оборудования, модернизация и повышение работоспособности действующего оборудования с целью подготовки его к автоматическому управлению;
- дальнейшая автоматизация обогатительных фабрик за счет внедрения разработанных систем автоматизации на базе автоматического контроля ионного состава пульпы, вещественного состава руды и продуктов обогащения, широкого применения для управления процессами электронно-вычислительной техники.

**Гравитационные методы обогащения.** Наиболее широкое применение при обогащении полезных ископаемых нашли процессы разделения в тяжелых суспензиях и отсадка, концентрация на столах, винтовые сепараторы, струйные концентраторы и другие методы и аппараты гравитационного обогащения.

*Процесс разделения в тяжелых суспензиях* используют в основном для предварительного обогащения (предконцентрации) исходной руды или горной массы после крупного или среднего дробления и обогащения коксующихся углей. К настоящему времени созданы установки для тяжелосреднего обогащения материала крупностью  $-150 + 6$  мм с сепаратором барабанного типа и различные конусные тяжелосредние сепараторы для обогащения материала крупностью  $-100 + (6-8)$  мм.

Создаются сепараторы колесного типа производительностью 600—700 т/ч, сепараторы с внутренней регенерацией тяжелой суспензии и турбоциклоны, ведутся работы по созданию крупных автоматизированных установок, обеспечивающих стабильную плотность суспензии и высокую эффективность работы, надежных в работе грохотов и специальных насосов, предназначенных для перекачивания суспензий.

Эффективность обогащения в барабанных и конусных сепараторах может быть повышена с помощью различных методов уменьшения структурирования суспензии. К ним относят оптимизацию соотношения ферросилиция и магнетита

в утяжелителе, вибрацию, ультразвук, добавки поверхностно-активных веществ.

При разработке технологических схем обогащения в тяжелых суспензиях основное внимание уделяется обогащению труднообогащаемых мелких классов в статических условиях и центробежном поле. Наиболее эффективно оно осуществляется при использовании тяжелосредних гидроциклонов и центрифуг.

Преимущество обогащения в тяжелых суспензиях в центробежном поле — возможность более четкого разделения тонкого материала, поскольку большие скорости потоков вызывают разрушение структурной вязкости и повышают стабильность суспензии при точности регулировки ее плотности до  $2,5 \text{ кг/м}^3$ . Поэтому при обогащении в тяжелосредних гидроциклонах крупность материала может быть снижена до  $0,5 \text{ мм}$ , а в тяжелосредних центрифугах — до  $50 \text{ мкм}$ .

*Отсадку* используют для предконцентрации и обогащения руд, углей и горной массы, выделения крупновкрапленных минералов (например, свинца в виде готового концентрата), улавливания свободных зерен благородных металлов и крупных сростков их с другими минералами в цикле измельчения. Для этих целей в России применяют серийные машины ОМ, специально для отсадки крупнодробленых руд — отсадочные машины типа МО с решетом площадью от  $2,5$  до  $24 \text{ м}^2$  с улучшенной регулировкой процесса отсадки и автоматической разгрузкой продуктов. Совершенствование машин направлено на улучшение конструкций электропневматического привода, разгрузочных устройств, обеспечение возможности осуществления более разнообразных циклов отсадки и повышение износостойкости решет в отсадочном отделении.

*Концентрацию на столах, винтовые сепараторы, струйные концентраторы* используют в основном при переработке руд редких металлов и продуктов обогащения, содержащих тяжелые минералы и благородные металлы. Износостойкость и эффективность работы покрытия рабочей поверхности аппаратов повышают за счет применения новых материалов.

Щелевые концентраторы, шлюзы, короткоконусные гидроциклоны, центробежные сепараторы и другие аппараты применяют для улавливания или извлечения в отдельных циклах обогащения драгоценных металлов и платиноидов.

**Магнитные методы обогащения.** Используют при переработке железных и медно-магнетитовых руд, для извлечения моноклинного пирротина из медно-никелевых руд, регенерации тяжелых суспензий, доизвлечения железосодержащих и других слабомагнитных минералов из руд и россыпей или хвостов обогащения с целью повышения комплексности использования перерабатываемого сырья.

Барабанные сепараторы с напряженностью магнитного поля в рабочей зоне на поверхности барабана 155—160 кА/м и производительностью по питанию соответственно 20 и 50 т/ч предназначены для сепарации сильномагнитных руд, обезжелезнения различных материалов крупностью до 6 мм и регенерации тяжелых суспензий. Валковые сепараторы с напряженностью магнитного поля в рабочей зоне на поверхности вала 1350 кА/м и производительностью по питанию от 0,7 до 12 т/ч могут быть использованы для сухого магнитного обогащения слабомагнитных руд, доводки черновых концентратов и обезжелезнения различных материалов крупностью до 2—3 мм. Роторные сепараторы со средней магнитной индукцией (при заполнении ротора зубчатыми пластинами) от 1,1 до 1,5 Тл и производительностью по питанию от 5 до 100 т/ч пригодны для мокрой магнитной сепарации тонкоизмельченных слабомагнитных руд, материалов крупностью не более 0,8 мм.

**Радиометрические методы обогащения.** Крупнопорционная сортировка руд, горной массы и вскрышных пород на радиометрических контрольных станциях (РКС) осуществляется рентгенорадиометрическим, нейтронно-активационным и фотонейтронным методами на основе измерения интенсивности первичного или вторичного излучения крупных объемов руд, загруженных в транспортные емкости (вагонетки, автомашины и др.). При этом кондиционные руды отделяют от забалансовых и пустой породы. Производительность РКС определяется в основном транспортными устройствами и может составлять тысячи тонн в час.

При радиометрической сепарации руд в операциях их предконцентрации и обогащения происходит поочередной анализ каждого куска, поэтому производительность сепараторов возрастает с увеличением и снижается с уменьшением крупности обрабатываемого материала. Крупность перераба-

тываемого материала составляет 10—150 мм, производительность сепараторов 20—150 т/ч. При этом широко используются сенсорные системы группы фирм «РТЗ Ор Сортиерз» (США): фотометрическая с гелионеоновым лазером (модель 16), радиометрическая (модель 17), электромагнитометрическая (модель 19), ультрафиолетовая. Фирмой «Гансонз Сортекс» (Великобритания) создана серия «М» фотометрических сепараторов для сортировки материалов различной крупности, мм:  $-150 + 50$  (811M);  $-75 + 30$  (712M);  $-50 + 19$  (711M);  $-35 + 15$  (1011M). В России выпускают рентгенолюминесцентные и фотометрические сепараторы, подготовлены для промышленного производства модели рентгенорадиометрического, радиорезонансного и термоэлектрического сепараторов.

**Флотационные методы обогащения.** С применением флотации в настоящее время перерабатывают многие типы руд, в том числе более 90 % руд цветных металлов. Совершенствование технологии флотационного обогащения осуществляется за счет внедрения новых технологических схем, реагентов, реагентных режимов и флотационных машин, применения различных видов энергетических воздействий в операциях пульпоподготовки и флотации, осуществления автоматического контроля и регулирования процессов коллективной и селективной флотации, а также кондиционирования оборотных вод и пульпоподготовки.

*Схемы с предварительной коллективной флотацией* всех извлекаемых ценных компонентов наиболее перспективны для бедных крупновкрапленных руд и руд с агрегатной вкрапленностью, при обогащении которых уже при грубом измельчении можно удалить в хвосты основную массу породы. Процесс коллективной флотации является в этих условиях предконцентрацией руд с минимальными затратами на измельчение и флотацию. Последующее разделение коллективного концентрата может быть осуществлено после доизмельчения его и раскрытия сростков методами селективной флотации.

К достоинствам схем с предварительной коллективной флотацией (Лениногорская фабрика и др.) относятся снижение эксплуатационных и капитальных затрат, повышение комплексности использования сырья и качества концентратов, возможность использования оборотных вод без предварительного кондицио-

нирования, более благоприятные условия для автоматизации технологического процесса. Недостатки схем связаны с трудностями разделения коллективных концентратов. Поэтому в настоящее время на обогатительных фабриках наиболее широко используют развитые стандартные коллективно-селективные (Карагайлинская, «Эрдэнэт» и др.) и селективно-коллективные схемы (Зыряновская и др.) флотации.

Развитие всех схем идет за счет увеличения стадийности измельчения и обогащения руды, обеспечивающей наибольшее раскрытие сростков, наименьшее переизмельчение извлекаемых минералов и повышение извлечения металлов и качества концентратов.

Получает дальнейшее развитие технология (особенно для медных и медно-молибденовых руд) с грубым измельчением руд в начале процесса, межциклового флотацией, классификацией руды на пески и шламы (с выделением в отвал тонкодисперсной фракции), доизмельчением и доизвлечением из песковой части хвостов полезных компонентов с использованием аполярных собирателей (фабрики бывшего СССР, США, Канады, Филиппин и др.).

Схемы с отдельной обработкой реагентами песковой и шламовой частей исходного питания или продуктов обогащения (концентрата, промпродукта или хвостов) позволяют полностью учесть различные физические и физико-химические свойства минералов песковой и шламовой фракций, оптимизировать их реагентную обработку и условия флотации посредством применения соответствующих типов машин.

Значительное повышение селективности и эффективности флотации достигается в результате *модификации существующих и применения новых флотационных реагентов*. Основные направления: замена токсичных реагентов на нетоксичные или менее токсичные; применение более селективно-действующих собирателей, пенообразователей, реагентов-модификаторов; изыскание реагентов, хорошо разрушающихся при химической или термической обработке.

Неустойчивость в промышленных условиях многих разработанных и весьма эффективных в лабораторных условиях реагентных режимов (в том числе бесцианидных) обусловлена большой их чувствительностью даже к небольшим изменени-

ям вещественного состава сырья и ионного состава пульпы. Поэтому условиями внедрения новых и повышения эффективности существующих режимов селективной флотации (в условиях возрастающих колебаний состава перерабатываемых руд) являются автоматический контроль и регулирование расхода реагентов по ионному составу пульпы в соответствии с количественными зависимостями, получаемыми в результате термодинамического анализа и физико-химического моделирования механизма действия реагентов в условиях разработанного или используемого процесса флотации.

Значительное повышение эффективности флотационного процесса может быть достигнуто за счет интенсификации процесса путем использования электрохимической, ультразвуковой и радиационной обработки пульпы и реагентов, применения добавок аполярных масел, сочетания собирателей (например, ксантогенатов и дитиофосфатов) с различной длиной углеводородных радикалов, регулирования окислительно-восстановительного потенциала пульпы с помощью загрузки реагентов-окислителей или реагентов-восстановителей, наложения внешнего электрического поля, подогрева пульпы, изменения продолжительности предварительной аэрации и концентрации кислорода в пульпе, регулирования ионного состава пульпы загрузкой ионообменных смол. Сущность перечисленных способов — регулирование электронных переходов, состава продуктов и скорости взаимодействия реагентов на минеральной поверхности и в объеме пульпы.

Селективность взаимодействия известных реагентов с поверхностью минеральных частиц при флотации руд может быть повышена их модифицированием по одному из следующих способов:

- подбором оптимальных сочетаний и соотношений реагентов-собирателей с различными дегидратирующими соединениями (неорганическими электролитами, органическими неэлектролитами типа карбамида, гваякола и др.), более эффективных, чем один собиратель;
- получением водорастворимых внутрикомплексных соединений на основе азотсодержащих веществ и солей цветных металлов для использования их в качестве селективных активаторов сульфидов меди, цинка и железа;



- получением новой модификации известного реагента в результате внедрения в него другой функциональной группы, специфической по отношению к конкретному катиону металла из группы разделяемых минералов;
- подбором оптимальных сочетаний и соотношений реагентов с различными активными веществами. Например, смесь медного купороса и фосфата, взятых в определенном соотношении, обладает сильным активирующим действием на флотацию пассивированных солями кальция сульфидов железа и сростков пирита с другими сульфидами и благородными металлами. Смесь активированного угля в определенном массовом соотношении с сульфидным реагентом обладает эффективным депрессирующим действием на флотацию сульфидов цинка.

*Совершенствование флотационных машин и аппаратов, их агитационных и аэрационных характеристик* сопровождается резким увеличением объема камер, как следствие общей тенденции к увеличению единичной мощности всего обогащательного оборудования, с целью снизить капитальные и эксплуатационные затраты, повысить общую производительность труда. Объем камер флотационных машин достигает 100 м<sup>3</sup> и более.

Основными типами флотационных машин являются механические («Денвер», «Механобр», «Вемко-Фогергрин» и др.), пневмомеханические («Оутокумпу», «Аджитейр» и др.) и пневматические (колонные, аэролифтные и др.). Основные потери извлекаемых минералов в хвостах флотации при их использовании находятся в крупных (более 100μ) и/или тонких классах (менее 15μ).

Для повышения эффективности процесса флотации крупнозернистых материалов проводят работы по применению в этих условиях флотационного оборудования, основанного на новых технологических принципах (например, вибрационная флотационная машина ВФМ-3,2, машины пенной сепарации на потоки 3—5 м<sup>3</sup>/мин. Фирмой «Оутокумпу Оу» (Финляндия) разработана специальная машина («Ским Эйр») для флотации крупных частиц раскрытых минералов и зерен благородных металлов из песков гидроциклона в плотной пульпе.

Для интенсивной флотации тонкоизмельченных материалов широко используют пневматические колонны и машины различной конструкции. В России для этих целей разработана машина ФМИЗ-3,2 с турбоцентробежным аэратором и специальным исполнением камеры, в которой зоны аэрации и всплывания разъединены.

*Комбинированные технологические схемы* с включением обогатительных и металлургических процессов используют при переработке сложных по составу, труднообогатимых руд цветных металлов, получение из которых только обогатительными методами высококачественных монометаллических концентратов с высоким извлечением практически невозможно.

К настоящему времени нашли применение, например, комбинированные схемы операций пирометаллургии и флотации: процесс «сегрегации», включающий предварительный обжиг руды с последующей флотацией восстановленных до металла меди или никеля; плавка на фанштейн с последующим его флотационным разделением на никелевый и медный концентраты; флотационное извлечение меди из шлаков медной плавки; переработка коллективных концентратов и полупродуктов процессами ПЖВ (плавки в жидкой ванне), КИВЦЭТ (кислородно-взвешенная циклонная электротермическая плавка), «Империал смелтинг» (плавка с возгонкой и конденсацией цинка), хлоридвозгонки и т. д.

Гидрометаллургические процессы, применяемые в комбинированных схемах, наиболее перспективны при переработке окисленных, смешанных и низкосортных сульфидных руд, бедных концентратов и полупродуктов. Например, применительно к труднообогатимым окисленным медным рудам разработаны и осуществляются в промышленном масштабе различные варианты серно-кислотного, хлоридного, аммиачного выщелачивания и перевода меди в раствор с использованием автоклавного, чанового, кучного и подземного выщелачивания. Интенсификация методов выщелачивания осуществляется путем использования различных культур микроорганизмов, обеспечивающих повышение скорости выщелачивания в 10—20 раз, поддержания рН в пределах 1,7—3,5, добавки минеральных солей и поверхностно-активных веществ. Для извлечения меди из растворов используют процес-

сы сорбции, экстракции, ионной флотации и цементации с последующей флотацией цементной меди.

Перспективным направлением применения комбинированных схем при переработке труднообогатимых руд является выделение при обогащении не поддающихся эффективному флотационному разделению коллективных концентратов или промпродуктов и получение богатых селективных концентратов. Выделяемые коллективные концентраты и промпродукты могут перерабатываться одним из пирометаллургических методов.

#### **1.2.4. Обезвоживание продуктов обогащения**

Проблема разделения твердой и жидкой фаз применительно к обогатительным и гидрометаллургическим процессам имеет особо важное значение, поскольку при этом приходится иметь дело с большими объемами пульпы и весьма малыми размерами частиц твердой фазы. Развитие и совершенствование процессов сгущения и фильтрования осуществляются как за счет увеличения удельной производительности оборудования, так и интенсификации.

*Сгущение.* Модернизированы сгустители с периферическим приводом и созданы сгустители с центральным приводом больших размеров, удовлетворяющие условиям работы на открытом воздухе при температуре до  $-60$  °С, диаметром от 25 до 100 м, оснащенные системами и устройствами для автоматического подъема и опускания грабельного механизма сгустителей.

Одновременно с созданием сгустителей больших размеров проведены исследования по интенсификации работы сгустителей и разработаны десятиканальные сифонные осадительные батареи (54-СГ). Установка этих батарей позволяет существенно снизить потери металла в сливе, а также уменьшить содержание частиц  $-10$  мкм в песках, поступающих на флотацию.

Разработан радиальный сгуститель диаметром 9 м, который оснащен канальными сифонными осадительными батареями и который можно использовать не только в качестве сгустителя, но и дешламатора. Удельная производительность

этого сгустителя существенно выше, чем радиального. Намечены разработка и производство радиально-канальных сгустителей диаметром 18; 30; 50 м. Создан также сгуститель с параллельными плоскостями по типу Ламелла. Этот сгуститель имеет малые габариты, легкую утепляемость, позволяющую ослабить тепловые потери, которые снижают чистоту слива. Рабочая площадь, занимаемая таким сгустителем, в 10 раз меньше, чем при использовании радиального сгустителя той же производительности.

С целью интенсификации процесса сгущения разработана технология, предусматривающая предварительную классификацию концентрата в гидроциклонах, пески которых поступают в вакуум-фильтры, а слив — в сгустители, что обеспечивает достижение большей плотности исходного питания фильтров, а следовательно, большей их производительности и облегчает работу гребкового устройства сгустителя. Кроме того, предусмотрена операция разрушения пены флотационных концентратов, выполняемая перед их классификацией в центробежном пеноразрушителе, разработанном в Механобре на основе блок-импеллера флотационной машины М6-А.

Перспективные флокулянты при сгущении продуктов обогащения — полиакриламид (ПАА) и полиокс. Исследуют свойства сухого ПАА, применение которого по сравнению с гелеобразным улучшает условия труда при растворении и повышает скорость осаждения суспензий. Ведут изыскания эффективных флокулянтов неизбирательного действия, чтобы снизить общие потери со сливами сгустителей при сгущении концентратов, и селективно-действующих флокулянтов для снижения потерь ценных компонентов в тонких классах ( $-10$  мкм) при использовании процесса сгущения перед операциями обогащения.

Для интенсификации процесса сгущения используется воздействие виброакустического, электрического, магнитного и других полей. Использование электрического поля вне сгустителей обычных типов испытывалось для уплотнения осадка при сгущении хвостовых пульп.

**Фильтрование.** Для фильтрования сгущенного продукта используют дисковые вакуум-фильтры, которые имеют относительно небольшую поверхность фильтрования. Для обез-

воживания больших объемов концентратов разработан вакуум-фильтр с площадью фильтрования 250 м<sup>2</sup>.

Замена хлопчатобумажных фильтротканей на синтетические, обладающие хорошим набором осадка, высокой степенью его сброса и постоянной производительностью в течение всего периода работы, существенно улучшает результаты фильтрования, повышает удельную производительность дисковых вакуум-фильтров и срок непрерывной их работы (в 4—5 раз), увеличивает срок службы ткани и улучшает чистоту фильтрата. Если при экипировке фильтра между перфорированной поверхностью барабана фильтра и фильтротканью расположить сетку из капроновой мононитки, то срок службы фильтроткани увеличивается в 10 раз и более с одновременным увеличением удельной производительности фильтра на 15—20 %.

Интенсифицировать процесс фильтрования и снизить влажность осадка можно посредством воздействия водяного пара, применения реагентов (обеспечивающих снижение вязкости жидкой фазы, гидрофобизацию поверхности частиц твердой фазы и т. д.), использования физических воздействий на пульпу и осадок (электроосмос и др.), новых конструкций секторов дисковых вакуум-фильтров из легких антикоррозионных материалов (в том числе из синтетических), пресс-фильтров типа «Ларокс» (Финляндия) или КМП-22 (Россия), высоковакуумных насосов.

### **1.3. Влияние вещественного состава полезных ископаемых на показатели обогащения**

К основным характеристикам вещественного состава полезных ископаемых, определяющим технико-экономические показатели обогащения, относят: содержание ценных компонентов; минеральный состав; характер вкрапленности и сростания минералов; наличие в них изоморфных примесей; вторичные изменения минералов вследствие окисления, выветривания и взаимоактивации.

*Содержание ценных компонентов.* При прочих равных условиях извлечение ценного компонента возрастает с увели-

чением его содержания в руде. Это обычно обусловлено тем, что содержание неизвлекаемой части его в руде более или менее одинаково и с увеличением общего содержания флотуемого компонента увеличивается доля его извлекаемой части. Однако при переработке на фабрике различных сортов руд такой связи может и не быть, если окажется, что в рудах с более высоким содержанием извлекаемого компонента он представлен труднофлотуруемыми или неизвлекаемыми минералами, а в рудах с небольшим содержанием данного компонента — легкофлотуруемыми минеральными разностями.

**Минеральный состав.** Технологические показатели по извлечению каждого компонента из руды и качество получаемых концентратов зависят от минерального состава руды, во-первых, потому, что каждый металл или элемент может быть представлен различными минералами, обладающими различной, например, флотуемостью. Изменение соотношения минеральных форм в сторону увеличения труднофлотуемых разностей извлекаемого компонента приводит к уменьшению его извлечения в концентрат. Во-вторых, возможность разделения извлекаемых минералов зависит от степени близости их технологических свойств и трудности его осуществления возрастают при разделении минералов с одинаковым анионом или катионом.

**Влияние генезиса полезных ископаемых.** Условия образования полезных ископаемых (генезис) определяют их строение, характер кристаллизации, изоморфизм, скорость и степень окисления и электронные свойства минералов.

Например, руды, образующиеся в результате раскристаллизаций расплавленных магм или осаждения минералов из горячих водных растворов, отличаются плотностью, крупнокристаллическим строением и не имеют пор. Окисленные же руды, образовавшиеся в процессе окисления и выщелачивания руд, характеризуются обычно мелкокристаллическим строением и большим числом пор, заполненных охристо-глинистым материалом. При измельчении таких руд охристо-глинистый материал образует большое количество так называемых «первичных» шламов, оказывающих вредное влияние на процесс обогащения.

Генезисом определяется также содержание изоморфной примеси в минералах. Значительное изменение содержания

изоморфного, например, железа в цинковой обманке, пентландите, молибдена в шеелите, марганца в вольфрамите оказывает существенное влияние на необходимые условия активации и депрессии изоморфных разновидностей минерала. Изоморфизм — основная причина наличия в рудах легко- и труднофлотуруемых разностей одного и того же минерала.

**Вторичные изменения минералов.** Вторичным изменениям могут быть подвергнуты как рудные минералы, так и минералы вмещающих пород.

Наиболее важные изменения минералов пустой породы связаны с окремнением, коалинизацией, хлоритизацией и серицитизацией их поверхности. Каолинизация и серицитизация — основные процессы изменения полевых шпатов, для железомagneзиальных минералов наиболее характерна хлоритизация. В процессе вторичных изменений происходит унификация поверхностных свойств различных породных минералов при возрастании общей степени их гидрофобности и образование большой массы легкофлотуруемых серицитохлоритовых шламов, даже при сравнительно крупном измельчении. В результате этого возрастают трудности депрессии пустой породы, предотвращения вредного влияния шламов и получения богатых концентратов.

Вторичные изменения рудных, например, сульфидных минералов связаны в основном с их окислением и взаимоактивацией, что приводит к образованию на их поверхности более полярных соединений, чем сами сульфиды, а также к унификации их свойств.

#### **1.4. Комплексность использования сырья в процессах его добычи и обогащения**

Целесообразность и необходимость комплексного использования полезных ископаемых обусловлены совокупностью факторов: геохимических, вследствие комплексного характера руд; технологических, в связи с наличием технологии, позволяющей разделить их на основные составляющие минеральные компоненты; экономических, в связи с возможностью получения дополнительной прибыли и повышения дру-

гих технико-экономических показателей (экономии капитальных затрат, трудовых ресурсов, высвобождения техники, сокращения земельного отвода и др.); экологических, поскольку безотходная технология добычи и переработки руд (при замкнутом водообороте) позволяет свести к минимуму влияние горного производства на окружающую среду.

Несмотря на многообразие типов полезных ископаемых, повышение комплексности их использования в горно-обогатительном производстве осуществляется по следующим общим направлениям.

***Повышение полноты использования недр при добыче полезных ископаемых.*** Этому способствуют технологические схемы с ядерно-физическим контролем контуров рудных тел, раздельной добычей технологически несовместимых сортов руд, предконцентрацией и сортировкой горной массы, внутрирудничным усреднением состава технологических сортов руд. Такие схемы позволяют снизить потери руд и разубоживание горной массы при добыче, выделить и усреднить до необходимых кондиций технологические сорта руд, выдать часть породы, выделенной из горной массы, в виде товарной продукции, использовать остальные отходы горного и обогатительного переделов для заполнения выработанного пространства.

***Повышение полноты извлечения основных и сопутствующих ценных компонентов.*** Повышение извлечения ценных компонентов осуществляется посредством совершенствования технологии рудоподготовки с целью более полного раскрытия сростков при минимальном переизмельчении извлекаемых минералов, использования разветвленных и многостадийных схем обогащения, изыскания более эффективных технологических режимов, применения комбинированных методов обогащения и освоения новых технологических процессов.

***Повышение извлечения благородных металлов.*** Значение руд, например, цветных металлов как дополнительного источника получения благородных металлов непрерывно возрастает.

Для извлечения свободного золота в циклах измельчения используют гидроловушки (фабрики «Хоумстейк», «Алмалыкская» и др.) и отсадочные машины (фабрики «Доум», «Зырянская» и др.), в операциях флотации — короткоконусные гидроциклоны и щелевые концентраторы (фабрики