

## ЛЕКЦИЯ 12. «СПОСОБЫ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ».

*Основные понятия. Показатели процесса обогащения.*

*Виды технологических операций при обогащении.*

Обогащение существует с древнейших времен как способ извлечения золота путем промывки золотоносных песков и подготовки руд к плавке. Описание ряда процессов и методов обогащения приведено в труде М.В. Ломоносова «Первые основания металлургии или рудных дел» (1763). Его современники И.И. Ползунов, К.Д. Фролов и В.А. Кулибин построили несколько механизированных обогатительных фабрик, оборудованных оригинальными машинами для промывки руд. В XIX в. возникли новые процессы и методы обогащения. Дальнейшее развитие в мире оно получило в первой половине XX в.

### **12.1 Основные понятия.**

**Обогащением руды** называется операция, увеличивающая содержание основного компонента (в железных рудах – железа, в медных – меди и т.д.) или снижающая содержание вредных примесей в руде.

Обогащение позволяет существенно повысить содержание полезного компонента в шихте, улучшить условия восстановления руды в шахтных печах, уменьшить выход шлака, улучшая тем самым ход печи и снижая расход кокса при возрастающей производительности.

Например, в доменном процессе повышение содержания железа в шихте на 1 % позволяет увеличить производительность печи на 2-2,5 % при снижении удельного расхода кокса на 2-2,5 %.

При обогащении получают несколько продуктов:

1) **Концентрат** – ценный продукт для дальнейшей переработки или употребления в других технологиях. Его ценность определяется содержанием полезного компонента или химического соединения.

2) **Промежуточный продукт** (промпродукт) – это продукт по плотности, минеральному и химическому составу занимающий среднее положение между концентратом и отходом. Промежуточные продукты не являются конечными продуктами обогащения и подвергаются дальнейшей переработке механическими или химическими способами.

3) **Отходы (хвосты)** – продукт обогащения, состоящий в основном из пустой породы или с незначительным содержанием полезных компонентов, извлечение которых технологически невозможно или экономически невыгодно.

## **12.2 Показатели процесса обогащения.**

**Основными технологическими показателями** процесса обогащения являются:

- извлечение полезных компонентов (ПК) в виде концентратов;
- выход концентрата;
- качество продуктов обогащения.

*Качество концентрата* определяется гранулометрическим составом и регламентирующими показателями предусмотренных техническими условиями (ТУ), ГОСТами или временными нормами.

**Содержание компонентов** в исходном полезном ископаемом  $\alpha$ , полученных концентратах  $\beta$  и хвостах  $\theta$  обычно измеряют в процентах, а содержание драгоценных металлов - в граммах на тонну продукта (г/т).

**Выход продукта обогащения**  $\gamma$  - количество полученного продукта (концентрата, хвостов), выраженное в процентах или долях единицы к исходному материалу. Суммарный выход всех продуктов обогащения должен соответствовать выходу исходного материала, принимаемому за 100 %. При разделении обогащаемого сырья на два конечных продукта - концентрат (с выходом  $\gamma_k$ ) и хвосты (с выходом  $\gamma_{хв}$ ) - это условие записывается равенством:

$$\gamma_k + \gamma_{хв} = 100\% \quad (1),$$

которое называемым **уравнением баланса продуктов.**

Принимая количество ПК в исходном за  $100\alpha$  равное его суммарное количество в концентрате  $\gamma_k\beta$  и хвостах  $\gamma_{хв}\theta$ , можно составить **уравнение баланса компонентов по исходному материалу и продуктам обогащения:**

$$100\alpha = \gamma_k\beta + (100 - \gamma_k)\theta \quad (2)$$

с учётом равенства баланса продуктов.

Опираясь на уравнение (2) относительно  $\gamma_k(\%)$ , получим зависимость для определения выхода концентрата и хвостов:

$$\gamma_k = 100(\alpha - \theta)/(\beta - \theta), \quad \gamma_{хв} = 100(\beta - \alpha)/(\beta - \theta) \quad (3)$$

**Извлечение  $\varepsilon$**  - показатель, по которому определяется переход части извлекаемого компонента, содержащегося в исходном материале, в концентрат или другой продукт обогащения и выражается в %, реже - в долях единицы.

Данный показатель - это отношение массы компонента в данном продукте  $\gamma\beta$  к его массе в исходном материале  $100\alpha$ .

Извлечение компонента в концентрат, %:

$$\varepsilon_k = (\gamma\beta) 100\% / (100\alpha) = \gamma\beta/\alpha \quad (4)$$

Если выход концентрата неизвестен, то извлечение компонента в концентрат можно рассчитать по уравнению

$$\varepsilon_k = (\beta/\alpha)(\alpha - \theta)100\% / (\beta - \theta), \quad (5)$$

которое получается путём подстановки в уравнение (4) выражения для  $\gamma$  из уравнения (3). *Суммарное извлечение каждого компонента во все полученные конечные продукты обогащения составляет 100 %.* Извлечение ценных компонентов в концентрат при обогащении полезных ископаемых составляет от 60 до 95 % и выше.

**Степень концентрации**  $K$  - показатель, указывающий во сколько раз увеличилось содержание ПК в концентрате по сравнению с его содержанием в исходном материале. Определяется как отношение содержания полезного компонента в концентрате  $\beta$  к содержанию его в исходном материале  $\alpha$ :

$$K = \beta/\alpha \quad (6)$$

Степень концентрации при обогащении полезных ископаемых может быть от 2 до 100.

**Эффективность обогащения** ПИ (%) при разделении на два продукта определяют по формуле Ханкокка-Луйкена:

$$\eta = (\varepsilon - \gamma_k) / (100 - \alpha) 100 \quad (7)$$

Процесс считается весьма эффективным, если  $\eta > 75\%$ , эффективным, если  $\eta > 50\%$ , и неэффективным, если  $\eta < 25\%$ .

Качественные и количественные показатели характеризуют техническое совершенство технологического процесса обогащения. При прочих равных условиях, чем выше содержание ценного компонента в концентрате, его извлечение, а также показатели степени концентрации, тем выше эффективность обогащения полезного ископаемого.

### **12.3 Технологические процессы фабрик обогащения.**

Процессы обогащения проводятся на обогатительных фабриках (ОФ). Все процессы ОФ подразделяются на подготовительные, основные и вспомогательные.

К **подготовительным процессам** относят дробление и измельчение. При этом достигается раскрытие минералов или угольной массы в результате раскрытия сростков полезных компонентов с пустой породой. Образуется механическая смесь частиц и кусков разного минерального состава или смесь угольно-породной массы. К подготовке относится также грохочение (классификация), которое позволяет проводить разделение по крупности кусков или частиц, а также обжиг.

К **основным процессам** относятся физические, физико-механические и физико-химические процессы способствующие разделению минерального сырья на концентрат и отходы. В процессах обогащения используются различия, в крупности, форме, плотности, магнитной проницаемости, смачиваемости, в электропроводности и др.

К **вспомогательным относятся процессы**, способствующие повышению эффективности основных процессов обогащения (предварительное обеспыливание смачиванием или удаление пыли воздушным всасыванием; обесшламливание путем центрифугирования и др.) и процессы, повышающие эффективность дальнейшей переработки полученных продуктов обогащения (обезвоживание, фильтрование, сушка).

Все подготовительные, основные и вспомогательные процессы называются **технологическими**.

### **12.4 Способы обогащения.**

Выбор технологической схемы зависит от вида полезного ископаемого. Основные критерии выбора: характеристика руды; условия, связанные с выходом и качеством продуктов обогащения. Основное правило: легче и дешевле получать бедные концентраты, при высоком извлечении и богатые концентраты при низком извлечении. Высокое извлечение в богатые концентраты, связано с высокими затратами; предел рентабельности обогащения колеблется в зависимости от технологических возможностей в каждом случае.

Рассмотрим подробнее основные схемы обогащения.

**Рудоразборка (сортировка)** используется для отделения кусков руды или угля от породы благодаря их разному цвету и блеску. Ее производят либо

вручную (например, при добыче драгоценных камней) отбором кусков обычно размером не менее 50 мм, редко до 25 мм на ленте конвейера, либо с помощью автоматических аппаратов.

Наиболее древним способом обогащения является **промывка руд**. Для некоторых видов полезных ископаемых промывка является обязательной стадией подготовки к дальнейшему обогащению.

Основной принцип промывки материалов состоит в том, что при перемещении руды (известняка) проточной водой в специальных устройствах (корыто-мойки – рис. 1, бутары – рис. 2, барабаны) происходит размягчение, а затем разрушение пустой породы, которая удаляется в виде грязной воды - шлама - из моечного аппарата.

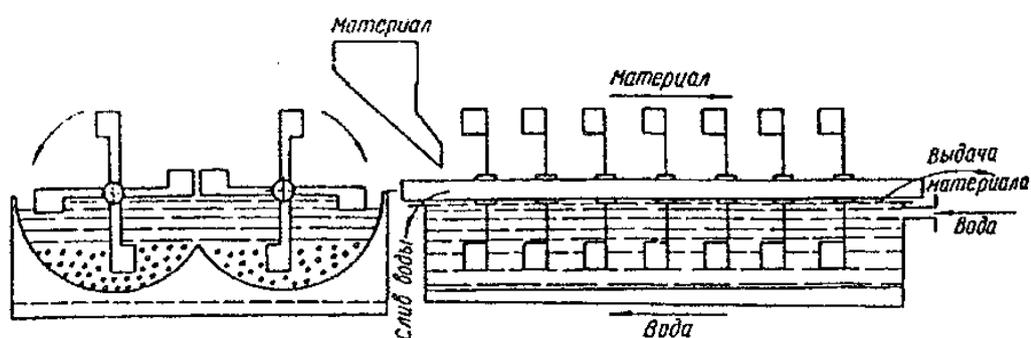


Рисунок 1 - Схема корытной мойки

На рис. 2 показана конструкция моечного аппарата, называемого бутарой, которая представляет собой конический или цилиндрический барабан, сделанный из сетки. Внутри барабана подается руда и вода. При вращении барабана происходит промывка руды и удаление с водой через сетку барабана размягченных глинистых и песчаных частиц. Расход воды на 1 т руды колеблется от 1 до 8 м<sup>3</sup>.

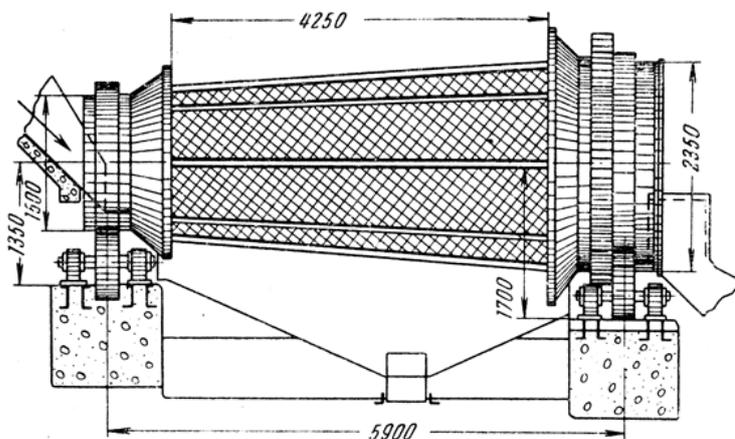


Рисунок 1 - Коническая бутара с решетчатой поверхностью для промывки руды

**Гравитационные методы обогащения** основаны на разделении минералов по плотности (*от слова гравитация – тяготение*). Многообразные методы этого вида обогащения основаны на различиях в скоростях движения частиц в водной или воздушной среде под действием гравитационных либо центробежных сил. С помощью гравитационных методов перерабатывается половина от общего количества обогащаемых полезных ископаемых.

Наиболее распространенным гравитационным способом является *обогащение в отсадочных машинах*. Крупность обогащаемой руды должна быть одинаковой и составлять от 0,5 до 60 мм. На погруженное в воду сито поступает обогащаемая руда, а через нее вверх и вниз циркулирует вода. При движении воды вверх более легкие кусочки поднимаются быстрее тяжелых, а при движении воды вниз тяжелые зерна будут опускаться быстрее легких. При этом нижние слои руды на сите будут наиболее богаты железом, так как их плотность больше (рис. 3). Обогащенную руду удаляют с сит специальными приспособлениями.

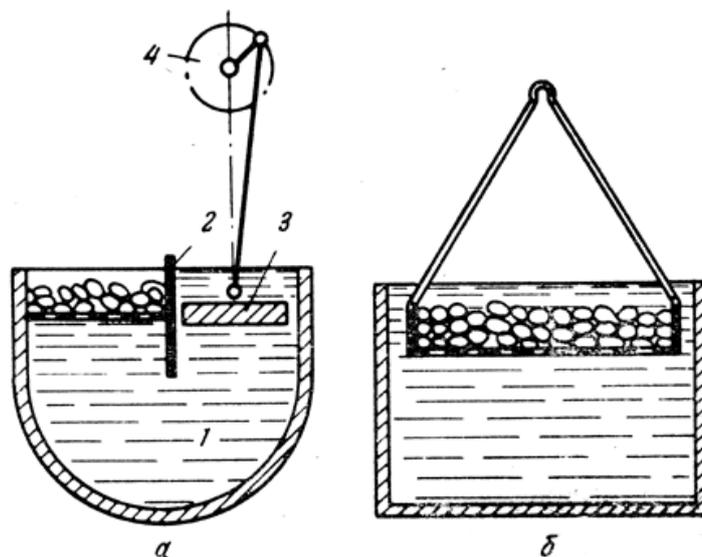


Рисунок 3 - Схема устройства отсадочной машины: а - поршневая машина; 1 - вода; 2 - разделительная перегородка; 3 - поршень; 4 - эксцентрик; б - машина с подвижным ситом

При работе в засушливых и холодных районах, а также при нежелании увлажнять целевые продукты (например, асбест или энергетический уголь) обогащение проводят в воздушной среде с помощью пневматических отсадочных машин и сепараторов.

*Обогащение в тяжелых средах*, которое широко применяется для переработки углей и горючих сланцев, основано на разделении компонентов сырья по плотности в среде, занимающей промежуточное положение между легкими и тяжелыми частицами. Более плотные частицы тонут, а более легкие всплывают на поверхность среды и удаляются специальными гребками. В

качестве тяжелых сред наиболее распространены суспензии - тонкоизмельченные в воде взвеси твердых частиц ( $<1$  мм) или утяжелителей. Так, при обогащении углей утяжелителем является магнетит ( $4,5-5,0$  г/см<sup>3</sup>), для полиметаллических, железных и др. руд и неметаллич. полезных ископаемых – гранулированный ферросилиций ( $6,9-7,0$  г/см<sup>3</sup>); иногда используют арсенопирит ( $6,0-6,2$  г/см<sup>3</sup>), галит ( $2,17$  г/см<sup>3</sup>) и т.п.

Обогащение в тяжелых средах проводится в специальных устройствах. Расход ферросилиция составляет от  $0,2$  до  $0,4$  кг и воды от  $0,13$  до  $0,2$  м<sup>3</sup> на 1 т руды.

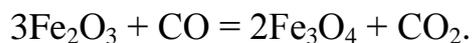
Основное достоинство метода - возможность получать результаты, близкие к расчетным, недостаток - необходимость регенерации суспензий.

**Обогащение (концентрирование) на столах** - разделение минеральных частиц по плотности (иногда по форме) в тонкой струе воды, текущей по наклонной плоскости (деке) специального стола, который совершает возвратно-поступательные движения (качания). Более эффективно на концентрационном столе разделяется материал, предварительно рассортированный на ряд классов по равнопадаемости (частицы разных размеров и плотности имеют одинаковую скорость падения в воде). Поверхность стола покрывается линолеумом, резиной, пластиком и др. материалом, на котором крепятся параллельные деревянные планки, расположенные параллельно направлению качания деки (частота колебаний  $4-7$  Гц, размах  $6-30$  мм). Минеральную пульпу и смывную воду подают в верхний угол деки. Разделяемые частицы различной плотности расходятся по поверхности деки веерообразно, под разными углами смыва, перемещаясь в продольном или поперечном направлении к разгрузочным устройствам. На концентрационных столах обычно обогащают руды редких металлов и ископаемое сырье россыпных месторождений, реже руды черных металлов и угли; оптимальный размер кусков руд  $4$  мм, углей  $12$  мм.

Наибольшее распространение получил метод магнитной сепарации для обогащения железных, марганцевых, медно-никелевых руд и руд редких металлов (преим. для перечистки чистовых концентратов и доводки коллективных, т. е. содержащих неск. ценных компонентов)..

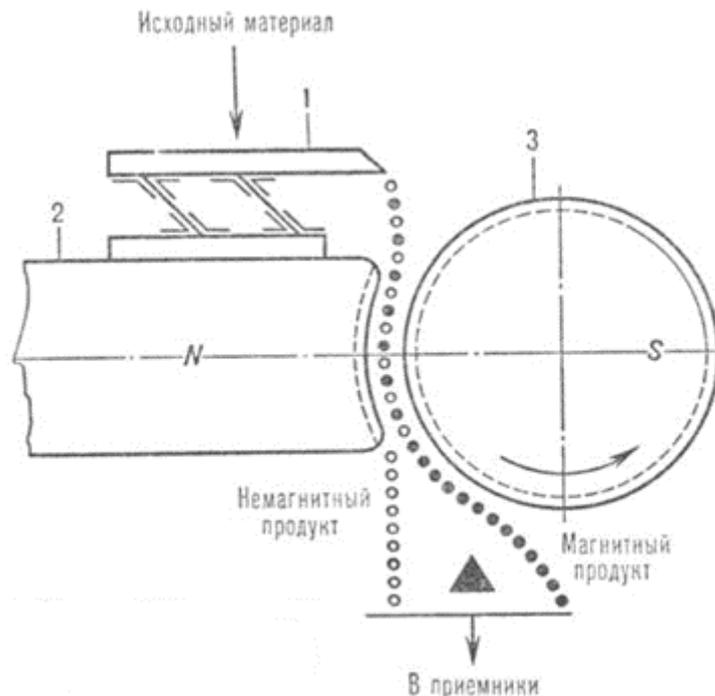
**Магнитное обогащение (магнитная сепарация)** основано на использовании различий в магнитных свойствах (например, магнитной восприимчивости) компонентов разделяемой смеси с размером частиц до  $100$ , иногда до  $150$  мм в неоднородном постоянном или переменном магнитном поле.

Магнитному обогащению железных руд иногда предшествует магнетизирующий обжиг слабомагнитных минералов в кипящем слое в присутствии газов-восстановителей. При этом слабомагнитные минералы  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeCO}_3$ ,  $\text{F}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  переходят в сильно магнитную окись  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  по реакции:



Магнитное обогащение бывает сухим и мокрым. При сухой сепарации обогащаются кусковые, а при мокрой - мелкие порошкообразные (естественные или специальные измельченные) руды. Процесс осуществляют в валковых, барабанных, роторных и иных магнитных сепараторах (рис. 4).

По магнитным свойствам все материалы на практике подразделяют на сильномагнитные (например, магнетит, франклит, пиротин, мартит), магнитные (ильменит, гематит, хромит и др.), слабомагнитные (глауконит, доломит, пирит и др.) и немагнитные (полевошпат, апатит, кварц, галенит и др.). В магнитном поле сепаратора магнитные частицы материалов намагничиваются и притягиваются к полюсам магнита (электромагнита); частицы немагнитных материалов не намагничиваются и свободно выводятся из аппарата.



1 – вибративный питатель; 2 – магнит; 3 – магнитный валок (барабан)

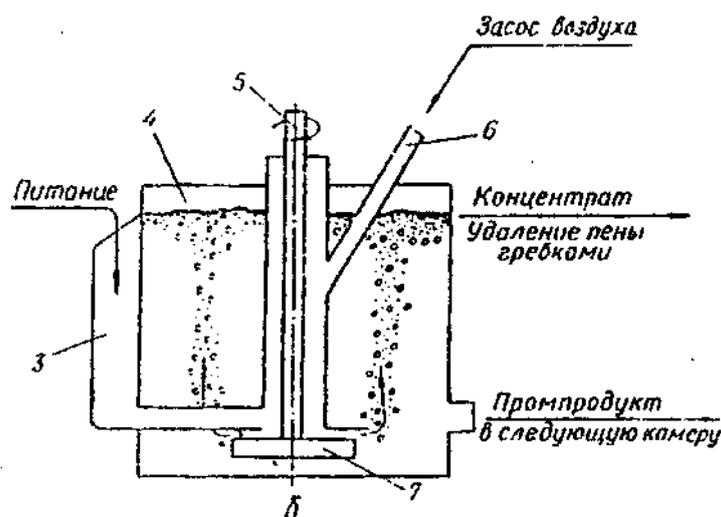
Рисунок 4 – Валковый магнитный сепаратор

Производительность магнитных сепараторов достигает 45-50 т/ч при обогащении тонкоизмельченных магнетитовых руд.

**Способ флотации** основан на избирательном смачивании материалов в результате которого отдельные мелкие частицы пород, входящих в состав обогащаемых руд, всплывают на поверхность воды вместе с пеной.

Во время флотации тонкоизмельченная руда (менее 1 мм) механически или воздухом перемешивается в флотационных машинах (рис. 5) с водой, к которой добавлены специальные вещества - флотореагенты. В настоящее время в качестве флотореагентов применяют дешевые масла и другие вещества. Образующаяся масса пузырьков поднимает на поверхность воды частицы богатой руды, которые прилипают к пузырькам. Бесконечное множество пузырьков с прилипшими к ним мельчайшими частицами богатой руды (концентрата) образуют прочную флотационную пену, которая удаляется специальными устройствами или самотеком.

После мокрого обогащения концентрат обезвоживают в специальных фильтровальных установках, в результате чего содержание влаги снижается до 8 - 12%.



3 - кишеня для вхідного продукту; 4 - чан; 5 - вал мішалки; 6 - труба для засмоктування повітря; 7 - мішалка (імпеллер)

Рисунок 5 - Схема камеры флотационной машины

Все перечисленные операции и методы разделения и концентрирования используют каждый в отдельности и в разных сочетаниях.

**Прочие способы.** Для обогащения полезных ископаемых используют также методы: фотонейтронный (бериллиевые руды), фотометрический (золотоносные руды и неметаллические материалы), фото- и

рентгенолюминесцентные (алмазы), гамма-абсорбционный (железные руды), нейтронно-абсорбционный (борные руды) и т.д.

**Главные направления и перспективы развития.** Обогащение позволяет извлекать из сырья 92,5-95,4% ценных компонентов. При этом их концентрация увеличивается в десятки и сотни раз. Например, из молибденовых и вольфрамовых руд с содержанием 0,05-0,1% Mo и 0,1-0,2% W приготавливают соответственно 47-50%-ные и 45-65%-ные концентраты; содержание в рудах тяжелых цветных металлов (Cu, Pb, Zn) составляет 0,3-2%, а получаемых концентратов - 2-70%; зольность углей снижается с 20-35 до 8-15%.

Традиционно сложившаяся система техники и технологии добычи полезных ископаемых и их обогащения создавалась главным образом для извлечения только одного основного рудного компонента и в настоящее время уже не отвечает все расширяющейся практике так называемой безотходной переработки минерального сырья. Поэтому необходимо совершенствовать отдельные процессы и методы обогащения и применять комбинированные схемы с целью макс. повышения качества концентратов; комплексно использовать полезные ископаемые с извлечением из них всех ценных компонентов и утилизацией отходов (чаще всего для изготовления строительных материалов); максимально автоматизировать производство; обеспечивать минимальное загрязнение окружающей среды.

Масштабы использования полезных ископаемых непрерывно возрастают, однако их качество ухудшается, а стоимость увеличивается вследствие перехода от разработки месторождений богатых руд к разработке месторождений бедных руд, к добыче минер. сырья, залегающего в труднодоступных районах, в сложных геологических условиях, на больших глубинах. Переработка обогащенного сырья значительно дешевле, чем природного; при перевозке концентратов вместо руды высвобождается большое число транспортных средств.

Концентраты обогащения различных руд представляют собой весьма тонкий порошок и не могут быть загружены непосредственно в металлургические печи без предварительного окучивания на фабриках окатышей или агломерационных фабриках.