

## *Лекция 14.*

# *МАГНИТНЫЙ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ*

### *План лекции*

*14.1 Теоретические основы процесса магнитной сепарации*

*14.2 Магнитные поля сепараторов*

*14.3 Магнитные сепараторы*

*14.4 Электрические методы обогащения*

*14.2.1 Теоретические основы процесса электрической сепарации*

*14.2.2 Электрические сепараторы*

*14.5 Специальные методы обогащения*

# *14.1 Теоретические основы процесса магнитной сепарации*

- Разделение минералов осуществляется в магнитном поле, которое образуется вокруг :
  - постоянных магнитов
  - проводников с электрическим током

- Силовой характеристикой магнитного поля является
- **магнитная индукция  $B$ ,**
- которая определяет:
  - силу, действующую в точке поля на движущийся электрический заряд
  - действие магнитного поля на тела, имеющие магнитный момент

- Индукция магнитного поля – величина векторная, численно равная силе, с которой магнитное поле действует на единичный элемент тока, направленной перпендикулярно полю

- Единицей магнитной индукции является ***тесла***
- 1Тл – индукция такого поля, в котором на каждый метр расположенного перпендикулярно к полю проводника при силе тока 1А действует сила 1Н

- **Напряженность магнитного поля**

- показывает число силовых линий магнитного поля, проходящих через  $1 \text{ см}^2$  поперечного сечения поля
- Напряженность магнитного поля не зависит от свойств среды, а определяется только силой тока и формой проводника
- В вакууме напряженность магнитного поля совпадает с магнитной индукцией  $B$

- Все вещества, помещенные в магнитное поле, намагничиваются, приобретают более или менее согласованную ориентацию элементарных токов
- В результате намагничивания создается дополнительное магнитное поле, которое, накладываясь на внешнее, изменяет его

- Влияние вещества на внешнее магнитное поле характеризуется величиной  $\mu$  - **магнитной проницаемостью вещества**
- **Магнитная проницаемость** - безразмерная физическая величина, характеризующая изменение магнитной индукции  $B$  среды под воздействием магнитного поля и напряженностью  $H$

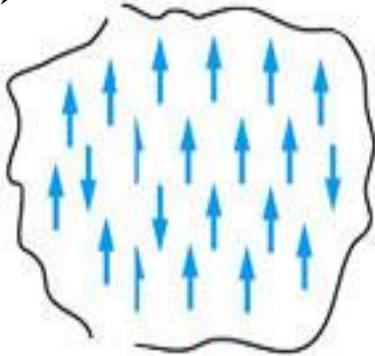
- вещества
  - ферромагнетики ( $\mu \gg 1$ )
  - парамагнетики ( $\mu > 1$ )
  - диамагнетики ( $\mu < 1$ )

## •Диамagnetики

- вещества, магнитные моменты атомов которых в отсутствии внешнего поля равны нулю
- молекулы не обладают собственным магнитным полем
- При внесении диамагнетика в магнитное поле его атомы приобретают наведенные магнитные моменты, направленные противоположно направлению внешнего магнитного поля

## •Парамагнетики

- намагничиваются в направлении внешнего магнитного поля
- к действию внешнего поля прибавляется действие наведенного внутреннего поля
- Если исключить внешнее поле, парамагнетики возвращаются в ненамагниченное состояние



- **Ферромагнетики**

- обладают сильными магнитными свойствами
- вещества, значительно усиливающие внешнее магнитное поле
- это такие металлы, как железо, кобальт и никель
- Эти вещества способны сохранять магнитные свойства и в отсутствии внешнего магнитного поля, представляя собой постоянные магниты

- все вещества в той или иной мере взаимодействуют с магнитным полем
  - у некоторых материалов магнитные свойства сохраняются и в отсутствие внешнего магнитного поля
  - намагничивание материалов происходит за счет токов, циркулирующих внутри атомов
- 
- в отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов вещества ориентированы обычно беспорядочно
  - создаваемые ими магнитные поля компенсируют друг друга
- 
- при наложении внешнего магнитного поля атомы стремятся сориентироваться своими магнитными моментами по направлению внешнего магнитного поля
  - компенсация магнитных моментов нарушается
  - тело приобретает магнитные свойства – **намагничивается**

**Магнитная восприимчивость** –  
физическая величина,  
характеризует способность  
вещества к намагничиванию под  
действием магнитного поля



$$\chi = J / H$$



Объемная магнитная восприимчивость равна  
отношению намагниченности единицы объема  
вещества  $J$  к напряженности  $H$   
намагничивающего магнитного поля

Магнитная восприимчивость  
величина безразмерная



Рассчитанная на единицу массы вещества она  
называется удельной магнитной  
восприимчивостью



$$\chi_{\text{уд.}} = \chi / \rho$$

где  $\rho$ - плотность вещества

- Магнитная восприимчивость может быть как положительной, так и отрицательной
  - магнитная восприимчивость положительная
    - намагничиваются по направлению внешнего поля
      - парамагнетики
      - ферромагнетики
  - отрицательная магнитная восприимчивость
    - диамагнетики

H= 70-120 кА/м  
или 1000-1500  
эрстед

• Сильномагнитные минералы (ферромагнитные)  $\chi > 1,26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$

магнетит  
( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ),  
титаномагнетит,  
маггемит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ),  
пирротин ( $\text{Fe}_n\text{S}_{n+1}$ )

• Слабомагнитные минералы (парамагнитные)  $1,26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг} < \chi < 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$

H= 120-1600  
кА/м или  
10-20 тыс.  
эрстед

минералы и диамагнитные  $\chi < 1,26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$

ряд окислов (гематит  
 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), гидроокислы  
(лимонит  $\text{HFeO}_2$ ),  
карбонаты железа (сидерит  
 $\text{Fe}[\text{CO}_3]$ ) и марганца,  
ильменит ( $\text{FeTiO}_3$ ),  
вольфрамит ( $\text{Mn,Fe}[\text{WO}_4]$ ),  
гранат, биотит и др.

кварц, циркон,  
рутил, кальцит,  
касситерит  
( $\text{SnO}_2$ ), апатит и  
др.

- Магнитные свойства минералов не являются постоянными физическими величинами
- **Магнитные свойства изменяются в зависимости**
  - напряженности магнитного поля, температуры, крупности измельчения, формы частиц, влажности, особенности кристаллической решетки, наличия изоморфных примесей и дефектов
  - Восприимчивость рудных частиц непостоянна и зависит от степени раскрытия сростков, их формы

- На результаты магнитной сепарации влияет разница
  - между удельными магнитными восприимчивостями
- крупность частиц
- неоднородность поля сепаратора по величине магнитной силы

- Отношение магнитных восприимчивостей разделяемых при обогащении рудных и нерудных зёрен называется
- Коэффициентом селективности магнитного обогащения
- $\chi_1/\chi_2 > 1$  (3-5)
- Отношение удельных магнитных восприимчивостей разделяемых минералов

## *14.2 Магнитные поля сепараторов*

- Однородное магнитное поле - напряженность в любой точке поля постоянная по величине и направлению  $\text{grad } H=0$
- В однородном магнитном поле частицы подвергаются воздействию только вращающего момента, ориентирующего их параллельно силовым линиям поля
- перемещения частиц к полюсам магнитной системы при этом не происходит

- В неоднородном поле, в котором  $\text{grad } H > 0$ , кроме вращающего момента, магнитные минералы испытывают силу  $F$ , которая перемещает их в направлении градиента поля, т.е. в направлении более интенсивных участков поля
- *Градиент напряженности* характеризует нарастание или снижение напряженности в неоднородном магнитном поле на единицу расстояния
- Наличие этой силы обуславливает отделение магнитных частиц от немагнитных при перемещении их через магнитное поле

- Сила, с которой магнитное поле действует на частицу вещества, помещенную в поле, называется магнитной силой ( $F_m$ )
- Магнитная сила зависит от величины удельной магнитной восприимчивости вещества и силы магнитного поля или его напряженности
- $F_m = \mu_0 \chi H \text{ grad} H \text{ m}$
- Магнитная сила  $F_m$ , действующая на минеральное зерно с массой  $m$ , помещенное в магнитное поле, равна потенциальной энергии, которую приобретает частица при намагничивании

- Магнитная сила, отнесенная к единице массы, действующая на частицу в магнитном поле (или в рабочей зоне сепаратора) - удельная магнитная сила ( $f_m$ ) притяжения

- $f_m = \mu_0 \chi H \text{ grad} H, \text{ Н/кг}$

- $\mu_0$  – магнитная постоянная, равна  $1,256 \cdot 10^{-6}$  Гн/м

- $\chi$  – удельная магнитная восприимчивость, м<sup>3</sup>/кг

- $H$  – напряженность магнитного поля, А/м       $\text{grad } H$  – градиент напряженности, А/м

- Магнитные сепараторы
  - применяется только неоднородное магнитное поле
  - создаваемое соответствующей формой полюсов
  - от которой зависит напряженность магнитного поля и магнитная сила

- ***Замкнутая магнитная система***

- два противоположно расположенных магнита с разноименными полюсами
- создают высокую напряженность магнитного поля (800- 1600 кА/м)
- применяются в сепараторах для обогащения слабомагнитных руд

- Открытая магнитная система
  - неоднородность создается чередованием нескольких полюсов разноименной полярности
  - не могут создать высокую напряженность магнитного поля (80-120 кА/м)
  - применяют для обогащения сильномагнитных руд

## магнитные сепараторы

применяются

магнитные

Постоянные магниты  
основаны на природных магнитах

– Co, Fe – Co – Ni,  
Fe – Al, Fe – Al – Ni  
– Co, ферритов,

используются  
также соединения  
редкоземельных  
элементов с  
кобальтом и т.п.

Электромеханическая система  
состоит из катушек с

обмотками,

сердечников  
помещенных

внутри катушек и  
полюсных  
наконечников

## *14.1.2 Магнитные сепараторы*

Магнитные и электромагнитные сепараторы классифицируются

- в зависимости от напряженности создаваемого магнитного поля
- способа обогащения (сухой или мокрый)
- способа подачи исходного питания
- направления движения руды и продуктов обогащения
- конструктивных особенностей

- По силе и напряженности магнитного поля
  - с сильным магнитным полем (напряженность 800-1600 кА/м), используются при выделении из руды слабомагнитных минералов
  - со слабым магнитным полем (напряженность 70-120 кА/м), используются при выделении из руды сильномагнитных минералов
  - с регулируемым магнитным полем

- способ обогащения

- Сепараторы с сильным магнитным полем применяются как для сухого, так и для мокрого обогащения тонкоизмельченных руд
- сепараторы со слабым полем используются обычно для сухого обогащения крупной руды

- По способу подачи исходной руды в рабочую зону
  - с верхней подачей
  - с нижней подачей

- Схема сепаратора с верхней подачей питания
  - исходный материал транспортирующим устройством подается в верхнюю часть вращающегося магнитного ролика
  - при выходе из рабочей зоны магнитные частицы под действием силы тяжести разгружаются в отсек магнитного продукта (концентрата)
  - немагнитные частицы под действием центробежной или силы движения воды направляются в отсек немагнитного продукта (хвосты)
  - применяются в основном для обогащения крупного и зернистого материала.

- Схема сепаратора с нижней подачей пинания
  - исходная руда подается транспортирующим устройством под вращающийся магнитный ролик
  - магнитные частицы попадают в отсек для концентрата
  - немагнитные частицы транспортирующим устройством подаются в отсек для хвостов
  - используются при обогащении мелкого материала

- Схема прямоточного сепаратора
- используется для обогащения руд крупностью от 0 до 6 мм

- Схема противоточного сепаратора
- используется для обогащения руд крупностью от 0 до 0,6 мм

- Схема полупротивоточного сепаратора
  - используется для обогащения руд крупностью от 0 до 0,5 мм (особенно подходит для крупности руд от 0 до 0,15 мм)

- В зависимости от конструктивного исполнения основного рабочего органа
  - валковые
  - барабанные
  - дисковый
  - И др.

•Обозначение магнитных сепараторов

•электромагнитные (Э) и с постоянным магнитом (П)

•для сухого и мокрого обогащения обозначают соответственно буквами С и М

•барабанные (Б), валковые (В), дисковые (Д), роликовые (Р) и др.

•с противоточной ванной (П), полупротивоточной ванной (ПП)

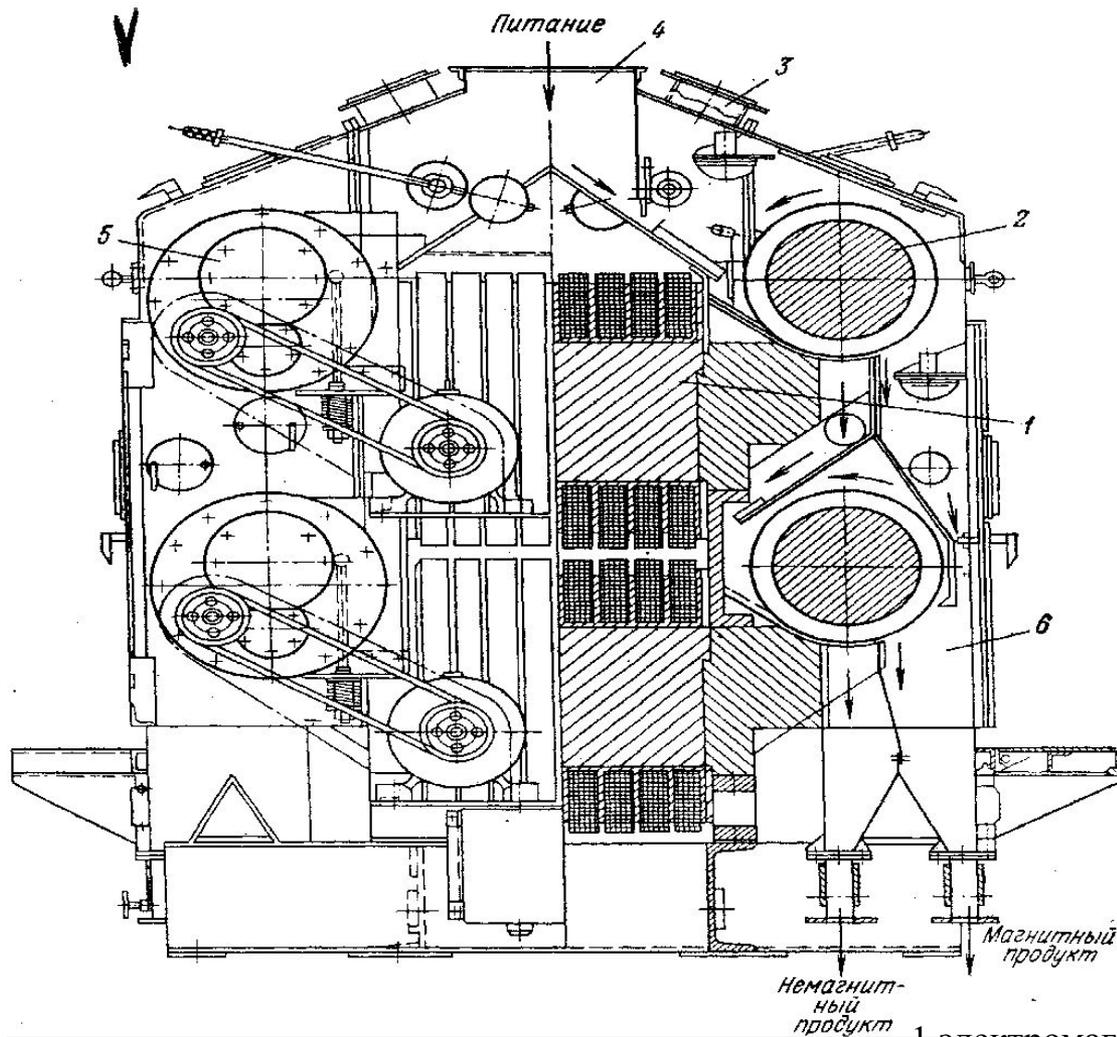
•число рабочих элементов (барабанов, валков, роликов), их диаметр и длина

2ПБМ-ПП-90/250

- барабанный сепаратор
- число барабанов 2
- с постоянным магнитом
- с полупротивоточной подачей
- для мокрого обогащения
- диаметром барабана 900 мм
- длиной 2500 мм

ЭБС-80/170

- электромагнитная система
- барабанный сепаратор
- сухой
- диаметр барабана 80 см
- длина барабана 170 см



5

# Электромагнитный валковый сепаратор ЭРС-6

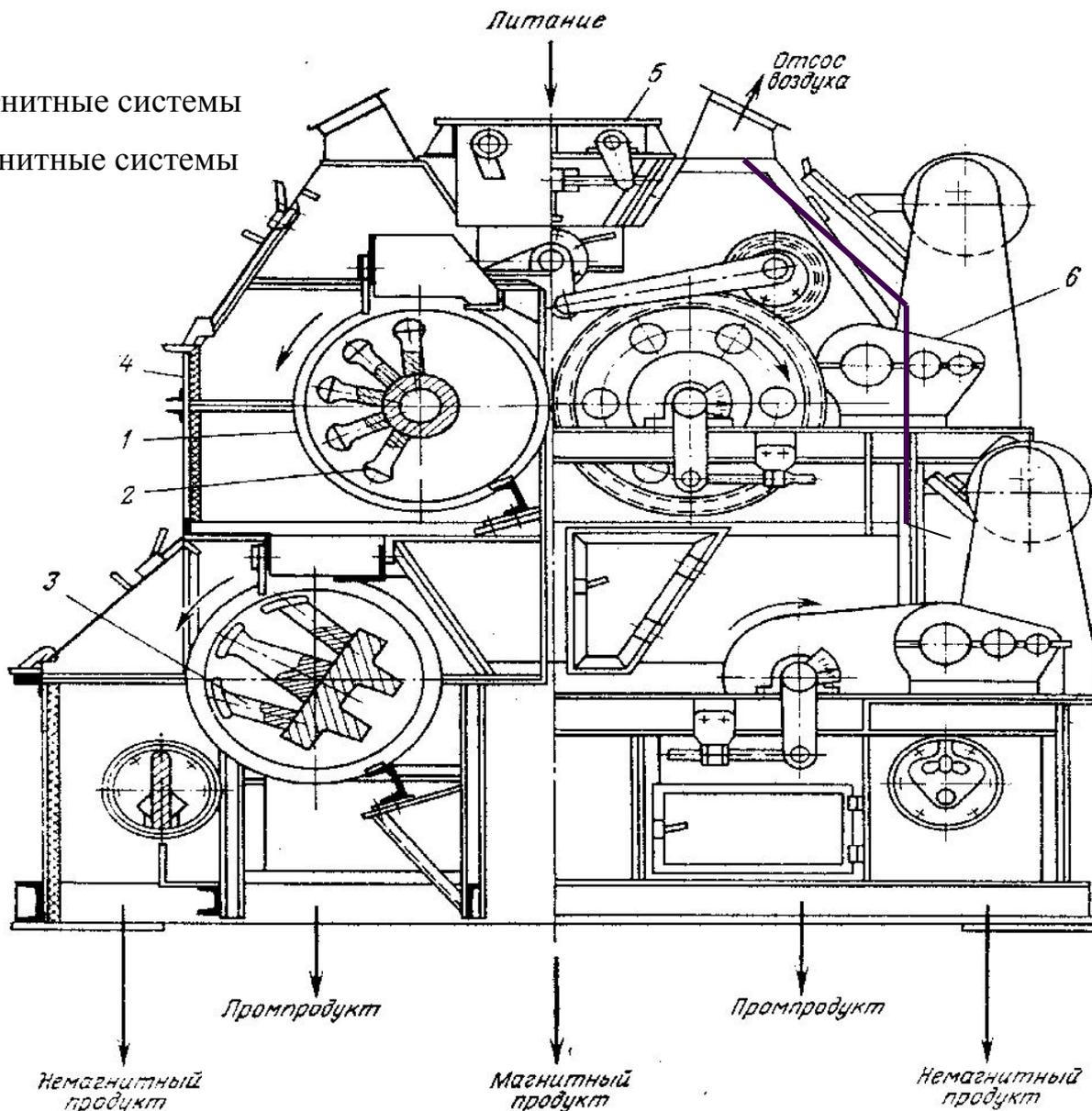
- 1. электромагнитная система
- 2. валок
- 3. эспирационный патрубок
- 4. питатель
- 5. сборник

1. барабаны

2. пятиполюсные магнитные системы

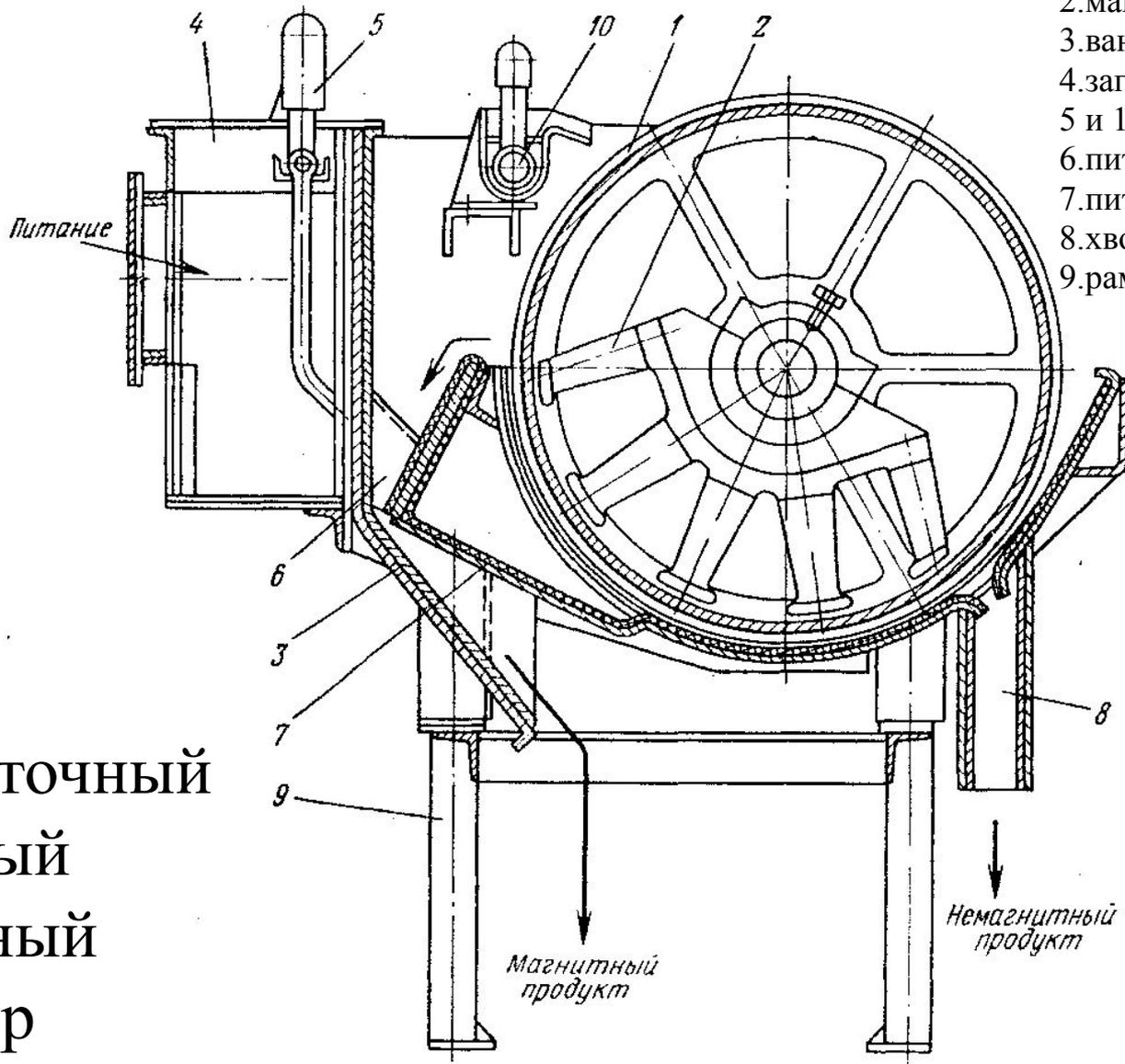
3. трехполюсные магнитные системы

4. рама с кожухом

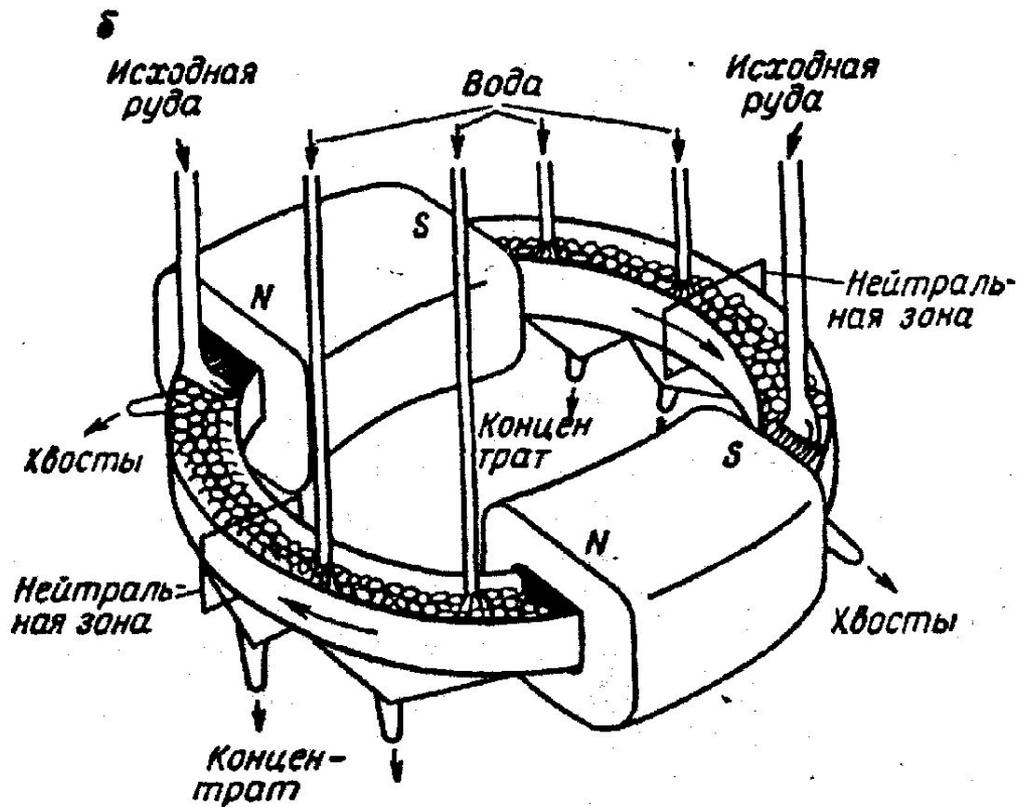


Магнитный барабанный сепаратор 189А-СЭ

Противоточный  
магнитный  
барабанный  
сепаратор  
ПБМ-4ПА



- 1. барабан
- 2. магнитная система
- 3. ванна
- 4. загрузочная коробка
- 5 и 10 .брызгала
- 6. питающие патрубки
- 7. питающий лоток
- 8. хвостовой патрубок
- 9. рама



Высокоградиентный сепаратор

## *14.4 Электрические методы обогащения*

### *14.2.1 Теоретические основы процесса электрической сепарации*

# Различия электрических свойств минералов проявляются

- электропроводности
- диэлектрической проницаемости
- контактном потенциале
- трибоэлектрическом, пьезоэлектрическом, пьезоэлектрическом эффектах
- различной способности под влиянием тех или иных физических воздействий приобретать электрические заряды, различные по величине или знаку

Проводники



Вещества,  
содержащие  
свободные  
заряженные  
микрочастицы

Диэлектрики  
(изоляторы)



Вещества,  
не  
содержащие  
свободных  
заряженных  
частиц

- Упорядоченное движение носителей зарядов называется электрическим током в веществе
- Под действием внешнего электрического поля положительные носители движутся вдоль поля, а отрицательные – против поля
- Это приводит к возникновению электрического тока, направленного вдоль поля

- В электрическом поле заряженные частицы под действием электрических и механических сил движутся по различным траекториям
- Электрические силы
  - пропорциональны величине заряда и напряженности электрического поля:
- $F_k = q E$
- происходит притягивание разноименно заряженных частиц и отталкивание одноименно заряженных
- Механические силы
  - сила тяжести, центробежная сила и сила сопротивления среды



• По величине электропроводности

• ***проводники***

$\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$  ( $10^2$ - $10^3$  См/м)

$10^4 - 10^5$

• ***полупроводники***

$\text{см}^{-1}$

$10^2 - 10^{-10}$  Ом<sup>-</sup>

• ( $10^{-8}$  См/м)

• ***непроводники (диэлектрики)***  $10^{-14}$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> ( $10^{-12}$  См/м) и ниже

- Физическая сущность процесса электрической сепарации заключается во взаимодействии электрического поля и минеральной частицы, обладающей определенным зарядом
- Важнейшая стадия электрической сепарации - это зарядка частиц (электризация)
- Существует несколько способов зарядки частиц
- Способ выбирается исходя из наиболее контрастных электрических свойств минерала

- касание
- индукция
- комбинированный
- газовыми ионами и разрядкой
- газовыми ионами

В зависимости от электрических свойств, используемых в качестве разделительного признака, различают следующие процессы электрического обогащения

- электрическая
- электростатическая
- диэлектрическая
- трибоэлектрическая
- трибоадгезионная
- электрическая классификация по крупности и форме

## Электрические методы применяются

- доводка черновых концентратов алмазных и редкометальных руд: титаноциркониевых; танталониобиевых; оловянно-вольфрамовых; редкоземельных (монацитксенотимовых).

Менее распространена электрическая сепарация

- гематитовых руд
- разделение кварца и полевого шпата
- калийных (сильвинитовых) руд
- вермикулита и других неметаллических полезных ископаемых

## *14.2.2 Электрические сепараторы*



- По виду электрода
- пластинчатые
- барабанные

- В практике обогащения применяются сепараторы
  - электростатические
  - коронно- электростатические
  - коронные

• *Схема барабанного электростатического сепаратора*

- 1 – бункер
- 2 — металлический заземленный барабан (осадительный электрод)
- 3 — некоронирующий высоковольтный электрод
- 4 — приемник для непроводящих частиц I, проводящих частиц III и их смеси II

- Схема барабанного коронного сепаратора
  - 1 – бункер
  - 2 — металлический заземленный барабан (осадительный электрод)
  - 3 — коронирующий высоковольтный электрод
  - 4 — приемник для непроводящих частиц I, проводящих частиц III и их смеси II
  - 5 — скребок

- Схема барабанного коронно-электростатического сепаратора

- 1 – бункер
- 2 — металлический заземленный барабан (осадительный электрод)
- 3 — коронирующий высоковольтный электрод
- 4 — отклоняющий электрод
- 5 — приемник для непроводящих частиц I, проводящих частиц III и их смеси II
- 6 — скребок

# Коронно-электростатический сепаратор ЭКС



# Сепаратор электростатический ЭБС-27/7,5



- Схема барабанного коронно-электростатического сепаратора

- 1 – бункер

- 2 — электризующий элемент

- 3 — металлический заземленный барабан (осадительный электрод)

- 4 — некоронирующий высоковольтный электрод

- 5 — приемник для отрицательно заряженных частиц I, положительно заряженных частиц III и незаряженных частиц II

- 6 — скребок

- Зарядка частиц разделяемых материалов осуществляется на наклонной плоскости за счет трибоэлектризации
- Подбирая материал плоскости можно регулировать знак заряда
- Подача на металлическую пластину высокого напряжения положительной или отрицательной полярности может значительно увеличить трибоэлектрический заряд

## •Схема барабанного пироэлектрического сепаратора

- 1 – бункер
- 2 — металлический заземленный барабан (осадительный электрод)
- 3 —электронагреватели
- 4 — приемник для электризующихся частиц кристаллов I, неэлектризующихся частиц III и их смеси II
- 5 — скребок

- Нагретый материал, попадая на холодную поверхность барабана, быстро охлаждается
- Кристаллические материалы, склонные к пьезоэлектризации заряжаются и удерживаются на поверхности барабана силами зеркального отображения вплоть до удаления их в приемник I
- Частицы других материалов не заряжаются, отрываются от поверхности барабана и попадают в приемник III

## *14.3 Специальные методы обогащения*

взаимодействия  
минералов с рабочей  
поверхностью  
обогачительного

аппарата

Различие в содержании  
ценного компонента в  
порции или кусках  
обогащаемого  
материала

Перевода разделяемых  
компонентов в другие  
фазовые состояния

Изменение размеров минералов при  
физическом взаимодействии

- обогащение по трению
- Упругости
- форме

- Ручная и механическая  
сортировка

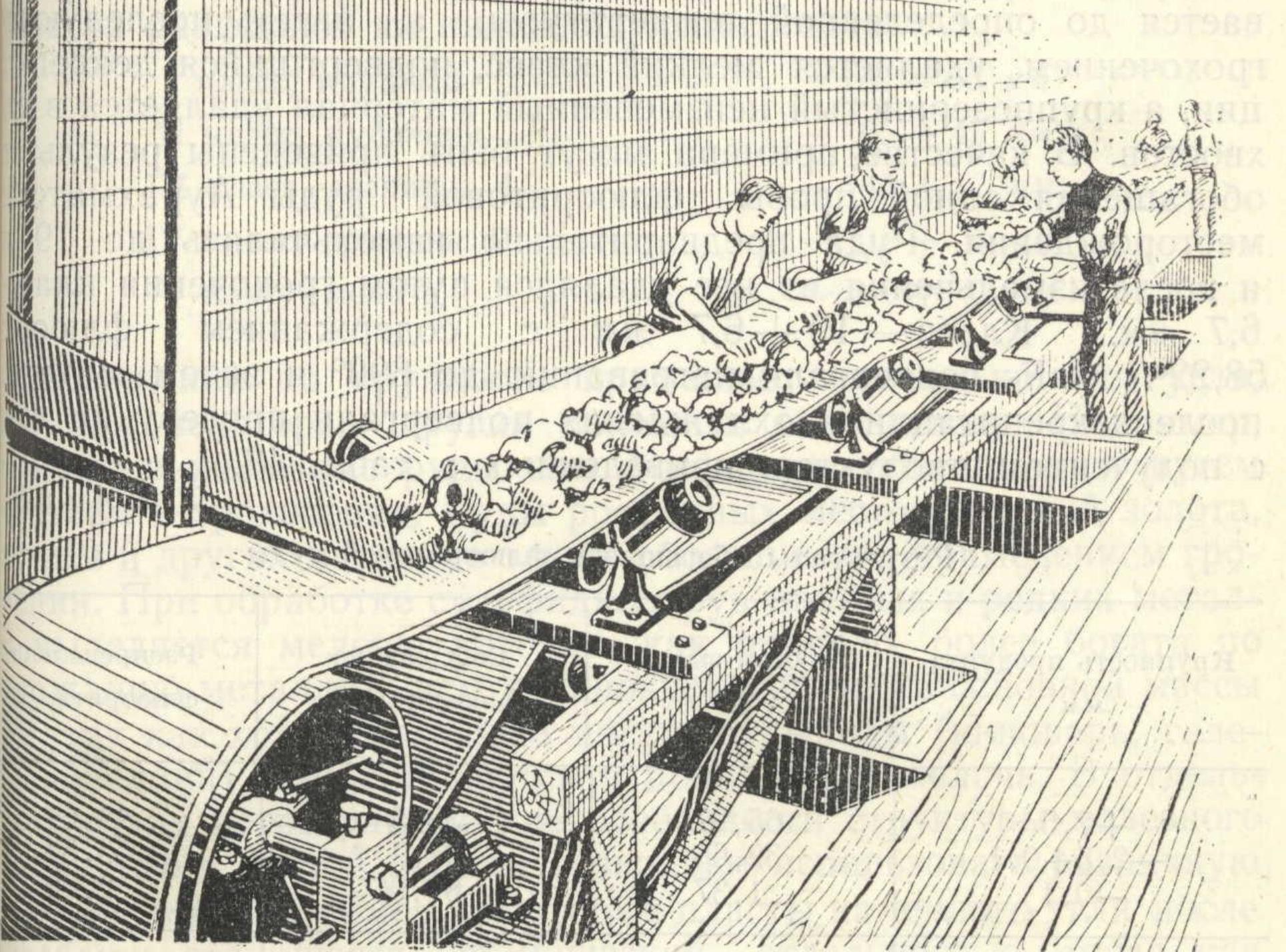
- Выщелачивание
- Экстракция
- Сорбция
- Обжиг

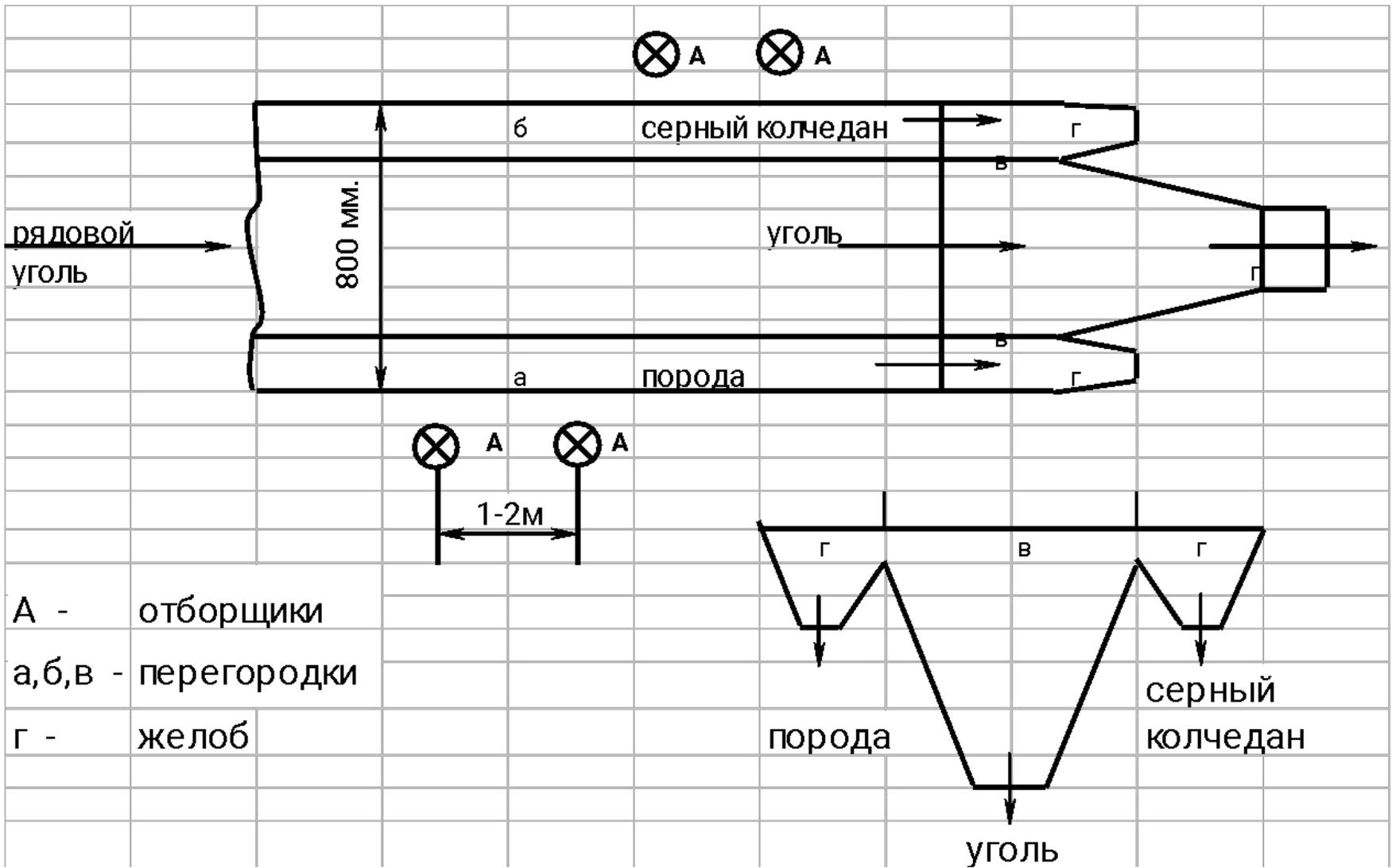
- Избирательное разрушение  
(дробление, измельчение)
- Промывка
- Декрипитация

- По упругости
  - 1-уголковый отражатель
  - 2-куски имеющие большую упругость
  - 3-куски имеющие малую упругость
  - 4-приемники
  - 5-упругая сетка

- По форме

- По трению





*В целях улучшения рудоразборки  
применяется специальное  
освещение*

- при отборке породы из золотосодержащих руд применяют голубой свет
- из свинцово-цинковых руд — кобальтово-синий свет
- из цинковой обманки — буровато-желтый свет

**Радиометрические  
методы  
обогащения.  
Используются  
разные виды  
излучений**

- радиоволновое
- инфракрасное
- видимый свет
- ультрафиолетовое
- рентгеновское
- гамма - излучение

## •Сепаратор

- 1 – бункер
- 2 – виброжелоб
- 3 - конический питатель
- 4 – конвейер
- 5 - неоновые лампы
- 6 - фотоэлектрические элементы
- 7 – сцинтиллятор
- 8 - разделительные желоба
- 9 — пневмоклапаны

# • **Кучное выщелачивание**

• **1- сточная канава**

• **2 – грунт**

• **3 -песок**

• **4 – полимерная плёнка**

• **5 -песок**

• **6 -слой больших кусков руды**

• **7 – штабель руды**

• **8 -растворитель**

• **9 — устройство для подачи растворителя**

# •Схема дробилки избирательного дробления

- 1- каток;
- 2- привод;
- 3- патрубок;
- 4- корпус;
- 5- грохот;
- 6- лопатка

- **Декрипитация - избирательное раскрытие, основанное на способности отдельных минералов разрушаться по плоскостям спайности при нагревании и последующем быстром охлаждении или только при нагревании.**