

В. А. ЕГОРОВ

**МАГНИТНЫЕ,
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
И СПЕЦИАЛЬНЫЕ
МЕТОДЫ
ОБОГАЩЕНИЯ
РУД**

622.7

830

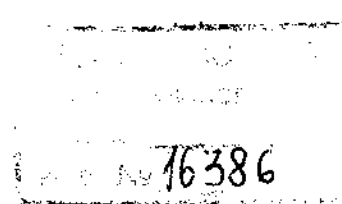
В. Л. ЕГОРОВ

622.7

830

МАГНИТНЫЕ,
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
И СПЕЦИАЛЬНЫЕ
МЕТОДЫ
ОБОГАЩЕНИЯ
РУД

*Допущено Министерством цветной металлургии
СССР в качестве учебного пособия для учащихся
горно-металлургических техникумов*



Москва
«Недра»
1977

ро-
пе-
ми
эн-
а-
и
у-
им
ты
к-
уд
да
к,
ий
ы
т-
р-
к,
я
у-
в
о

✓

Егоров В. Л. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения руд. М., «Недра», 1977. 200 с.

В книге изложены основные сведения о процессах магнитной и электрической сепарации материалов. Рассмотрена физическая сущность процессов разделения минеральных частиц по магнитным и электрическим свойствам, описаны устройство и принцип работы современных магнитных и электрических сепараторов. Приведены примеры применения магнитных и электрических методов обогащения в технологических схемах обогатительных фабрик.

Приведены специальные методы обогащения полезных ископаемых и применяемое оборудование.

Книга предназначена в качестве учебного пособия для учащихся горно-металлургических техникумов по специальности «Обогащение полезных ископаемых», а также может быть использована инженерно-техническими работниками обогатительных фабрик.

Табл. 23, ил. 75, список лит. — 21 назв.

30706—116
Е 043(01)—76 202—77

© Издательство «Недра», 1977

ВВЕДЕНИЕ

Коммунистическая партия и Советское правительство проявляют постоянную заботу о своевременном и полном обеспечении народного хозяйства страны всеми необходимыми видами минерального сырья. Важная роль в решении этой задачи принадлежит горно-обогатительным предприятиям.

В решениях XXV съезда КПСС указано, что в области обогащения руд необходимо внедрять высокоэффективные схемы и экономичные методы обогащения, гидromеталлургические и другие прогрессивные технологические процессы. Этим требованиям полностью удовлетворяют магнитные и электрические методы обогащения, которые получили широкое распространение в практике переработки многих полезных ископаемых, в том числе руд редких и цветных металлов.

Большой вклад в разработку и внедрение магнитного метода обогащения в СССР внесли советские ученые И. С. Дацюк, В. Г. Деркач, В. И. Кармазин, В. В. Кармазин, В. В. Крутий и др. Благодаря их исследованиям разработаны и внедрены в промышленность наиболее современные конструкции магнитных сепараторов, не уступающих по производительности и эффективности разделения лучшим зарубежным образцам.

Магнитный метод применяется для обогащения железных, марганцевых, редкометалльных и других типов руд, а также для очистки от магнитных включений формовочных, стекольных песков и абразивных материалов. Благодаря созданию сепараторов с сильными магнитными полями область применения магнитного метода обогащения непрерывно расширяется.

Дальнейшее развитие техники и технологии магнитного метода обогащения связано с разработкой и внедрением быстрых магнитных сепараторов с повышенной напряженностью поля, а также созданием сепараторов, совмещающих в одном аппарате несколько операций по перечистке концентрата и хвостов.

Перед обогатителями стоит задача совершенствования аппаратуры и технологии метода полиградиентной сепарации, с помощью которого возможно решение проблемы эффективного обогащения тонкозернистых слабомагнитных руд.

Электрический метод обогащения по сравнению с магнитным начал развиваться несколько позже. В разработке и внедрении этого метода важная роль принадлежит советским исследователям И. Н. Плаксину, Н. Ф. Олофинскому, В. М. Бачковскому и др.

В настоящее время электрический метод обогащения широко применяется для доводки титано-циркониевых, алмазсодержа-

щих, пироклоровых, полевошпатовых концентратов и кварца. Разработана промышленная технология электрической сепарации каменной соли и диэлектрической сепарации редкоземельных концентратов. Развивается метод селективной обработки минералов поверхностно-активными реагентами для искусственного изменения их электропроводности, что открывает новые области применения электросепарации.

Промышленностью освоены высокопроизводительные секционные коронно-электростатические сепараторы, позволяющие в одном аппарате осуществлять различные технологические схемы с получением готовых продуктов обогащения. Для разделения неэлектропроводных минералов титано-циркониевых россыпей внедрены и успешно работают трибоэлектростатические сепараторы.

Основной задачей в области электрической сепарации является расширение номенклатуры сырья, обогащаемого этим методом, повышение производительности сепараторов и комплексная автоматизация технологического процесса.

При переработке некоторых полезных ископаемых успешно применяются специальные методы обогащения, основанные на различии минералов в цвете, блеске, форме зерен, радиоактивности, избирательной способности минералов удерживаться жидкими поверхностями. Практический интерес представляют методы радиометрической сепарации, основанные на различии естественной радиоактивности разделяемых минералов, а также на различии в люминесценции и отражении света. Эти методы применяются при обогащении урановых руд, алмазов, кварца и других полезных ископаемых.

Для обогащения сложных по составу руд и доводки некоторых концентратов применяются комбинированные технологические схемы с использованием гидрометаллургических процессов, основанных на селективном растворении ценных компонентов руды или их вредных примесей водными растворами химических реагентов. Гидрометаллургические процессы применяются при обогащении медных, вольфрам-молибденовых, золотосодержащих и других руд.

В настоящем учебном пособии специальные методы обогащения рассмотрены в объеме, соответствующем требованиям программы для подготовки техников-обогащателей.

Автор выражает глубокую благодарность канд. техн. наук В. В. Кармазину, рецензентам канд. техн. наук О. К. Комарову, инженерам Х. М. Рыскильдиной и Р. Х. Хамитову за ценные замечания, которые помогли улучшить содержание книги.

Раздел первый

МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ

Глава I

Физические основы магнитных методов обогащения

§ 1. Общие сведения о магнитной сепарации материалов

Магнитное обогащение основано на различии в магнитных свойствах разделяемых компонентов руд черных, редких и цветных металлов. Сущность магнитного метода обогащения заключается в воздействии на частицы руды магнитной и механической сил, в результате которого частицы с различными магнитными свойствами приобретают различные траектории движения. Перемещаясь по своим траекториям, магнитные и немагнитные частицы выводятся из магнитного поля в виде отдельных продуктов, отличающихся не только по магнитным свойствам, но и по вещественному составу.

По магнитным свойствам минералы могут разделяться в постоянном и переменном магнитных полях. В настоящее время наиболее широко применяется обогащение в постоянном магнитном поле.

Осуществляется магнитное обогащение в магнитных сепараторах. Для магнитного разделения в определенном пространстве сепаратора, называемом рабочей зоной, необходимо создать магнитное поле, напряженность которого была бы неодинаковой в различных его точках. Такое магнитное поле называется неоднородным. В магнитном обогащении применяются только неоднородные поля, которые обуславливают появление магнитных сил, действующих на магнитные частицы.

Кроме неоднородности магнитное поле должно иметь достаточную для данного сырья напряженность. В зависимости от магнитной восприимчивости рудных частиц их разделение осуществляется в слабых или сильных магнитных полях.

Поведение зерен в магнитном поле зависит от соотношения действующих на них магнитных и механических сил. Поэтому для понимания сущности процесса магнитного обогащения необходимо уметь определять и анализировать эти силы. А это, в свою очередь, требует знания свойств магнитных полей и проявления этих свойств при различной физической характеристике

обогащаемого сырья. В связи с этим изучение магнитного метода обогащения целесообразно начать с рассмотрения основных магнитных величин, характеризующих магнитное поле и вещество.

§ 2. Магнитное поле и его свойства

Магнитное поле представляет собой пространство, в котором проявляется действие магнитных сил на намагниченные тела. Действие этих сил на намагниченные тела объясняется наличием в телах быстро движущихся внутримолекулярных электрических зарядов.

Изображается магнитное поле силовыми линиями, общее число которых, пронизывающее ортогональную поверхность, называется *магнитным потоком* Φ . Единицей магнитного потока в системе СИ служит вебер (Вб), в системе СГСМ — максвелл (Мкс).

Основной характеристикой магнитного поля является *магнитная индукция* B , которая численно равна количеству силовых линий поля, пронизывающих площадь $S=1 \text{ м}^2$ (1 см^2) данного сечения. Магнитная индукция — это векторная величина, определяемая по силовому воздействию магнитного поля на ток. Единицей магнитной индукции в системе СИ служит тесла (T), в системе СГСМ — гаусс (Гс). Согласно определению магнитная индукция и магнитный поток связаны соотношением

$$B = \frac{\Phi}{S}. \quad (1)$$

Для характеристики намагниченности вещества в магнитном поле используется *магнитный момент* p_m , который численно равен механическому моменту, испытываемому веществом в магнитном поле с индукцией 1 тесла (система СИ) или 1 гаусс (система СГСМ).

Единица магнитного момента не имеет специального названия. В системе СИ единицей магнитного момента является момент вещества (контура), которое в поле с индукцией 1 тесла испытывает максимальный вращающий момент, равный 1 ньютон·метр. В системе СГСМ единицей магнитного момента является момент вещества (контура), которое в поле с индукцией 1 гаусс испытывает максимальный вращающий момент, равный 1 дин·см.

Магнитный момент определяем из уравнения

$$p_m = \frac{M}{B \sin \alpha}, \quad (2)$$

где M — механический момент, испытываемый веществом;
 α — угол между вектором индукции и вектором магнитного момента.

Магнитный момент единицы объема вещества характеризует интенсивность его намагничивания или *намагниченность* I , определяемую по формуле

$$I = \frac{p_m}{V}, \quad (3)$$

где V — объем вещества.

Влияние формы тела на его намагниченность в магнитном поле характеризуется *коэффициентом размагничивания* N , зависящим от основных размеров тела

$$N = f\left(\frac{a}{b}\right), \quad (4)$$

где a и b — продольная и поперечная оси частицы или тела.

Намагниченность тоже величина векторная и является наряду с магнитной индукцией важной характеристикой магнитного поля. Намагниченность в системе СИ измеряется в амперах на метр (А/м), в системе СГСМ — в гауссах (Гс).

Магнитное поле характеризуется величиной напряженности магнитного поля H . *Напряженностью магнитного поля* в данной точке называется сила, с которой поле действует на единицу положительной магнитной массы, помещенную в эту точку поля.

Единицей напряженности магнитного поля в системе СИ служит ампер на метр (А/м) или ампер-виток на метр (Ав/м), в системе СГСМ — эрстед (Э).

Для характеристики изменения напряженности магнитного поля в данном направлении x служит величина *градиента напряженности* $\text{grad } H$

$$\text{grad } H = \frac{dH}{dx}, \quad (5)$$

где dH — изменение напряженности магнитного поля в направлении x на участке протяженностью dx .

Размерность градиента напряженности в системе СИ ампер на квадратный метр (А/м²) или ампер-виток на квадратный метр (Ав/м²), в системе СГСМ — эрстед на сантиметр (Э/см).

Три векторные величины \vec{B} , \vec{I} и \vec{H} связаны между собой следующей зависимостью:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{I}), \quad (6)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, характеризующая магнитные свойства вакуума; в системе СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Г/м}$, в системе СГСМ $\mu_0 = 1$.

Суммарная напряженность магнитного поля данного контура характеризует его *магнитодвижущую силу* $F_{\text{мдс}}$, которая определяется по формуле

$$F_{\text{мдс}} = 4\pi nI, \quad (7)$$

где n — число витков замкнутого контура (например, соленоида);
 I — ток, протекающий по виткам.

Размерность магнитодвижущей силы в системе СИ совпадает с размерностью силы тока и единица ее также называется ампер (А). Поскольку при расчете магнитных цепей полная магнитодвижущая сила равна силе тока в каждом витке, умноженной на число витков, часто выражают магнитодвижущую силу в ампер-витках (Ав). Единицей магнитодвижущей силы в системе СГСМ является гильберт (Гб).

Магнитные свойства вещества характеризуются *магнитной восприимчивостью* χ (величина безразмерная), которая определяется как отношение интенсивности намагничивания к напряженности поля

$$\chi = \frac{I}{H}. \quad (8)$$

Единица магнитной восприимчивости в системе СИ численно равна магнитному моменту вещества объемом 1 м^3 в магнитном поле напряженностью $H=1 \text{ А/м}$, в системе СГСМ — магнитному моменту вещества объемом 1 см^3 в поле напряженностью $H=1 \text{ Э}$.

Магнитный момент 1 килограмма вещества в поле $H=1 \text{ А/м}$ в системе СИ или 1 грамма вещества в поле $H=1 \text{ Э}$ в системе СГСМ характеризует *удельную магнитную восприимчивость вещества* χ и определяется по формуле

$$\chi = \frac{\chi}{\delta}, \quad (9)$$

где δ — плотность вещества.

Размерность удельной магнитной восприимчивости в системе СИ — $\text{м}^3/\text{кг}$, в системе СГСМ — $\text{см}^3/\text{г}$.

Сила, с которой магнитное поле действует на частицу с удельной магнитной восприимчивостью $\chi=1$, помещенную в данную точку поля, называется *силой магнита* F и определяется по формуле

$$F = H \text{ grad } H. \quad (10)$$

Размерность силы магнита в системе СИ — ампер в квадрате на кубический метр ($\text{А}^2/\text{м}^3$) или ампер-виток в квадрате на кубический метр ($\text{Ав}^2/\text{м}^3$), в системе СГСМ — эрстед в квадрате на сантиметр ($\text{Э}^2/\text{см}$).

Сила, действующая на вещество в магнитном поле, называется *магнитной силой* $F_{\text{магн}}$ и определяется по формуле

$$F_{\text{магн}} = \mu_0 \chi H \text{ grad } H. \quad (11)$$

Размерность магнитной силы в системе СИ — ньютон на килограмм (Н/кг), в системе СГСМ — дин/г.

Основные электрические и магнитные величины, их размерности и обозначения приведены в приложении I.

В магнитных сепараторах магнитное поле создается системами из постоянных магнитов или электромагнитными системами с обмоткой, питаемой постоянным, импульсным выпрямлен-

ным или переменным током. Поля большой силы создаются магнитными системами, изготовленными из сверхпроводящих материалов.

Магнитные поля бывают *постоянной и непостоянной полярности*. Изменение полярности поля происходит, например, при перемещении рудных частиц вдоль разноименных полюсов магнита, при вращении постоянных магнитов, а также при применении бегущего поля, создаваемого трехфазным переменным током в электромагнитах. Переменный ток не нашел широкого практического применения в связи с большими потерями энергии на перемагничивание металла системы.

Магнитные поля могут быть *однородными* ($\frac{dH}{dx} = 0$) и *неоднородными* ($\frac{dH}{dx} > 0$). Однородное тело наблюдается при плоских и параллельных поверхностях полюсов магнитов, неоднородное — при заостренных полюсах. Неоднородное поле, в котором сила магнита $H \text{ grad } H = \text{const}$, называется *изодинамическим*, т. е. имеющим в любой точке силу, одинаковую по величине и направлению.

Одним из важнейших свойств магнитного поля служит *явление электромагнитной индукции*. Суть явления состоит в том, что при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего какой-либо контур, в нем наводится электродвижущая сила (э. д. с.).

Другим свойством магнитного поля является механическое взаимодействие его с электрическим током. Сила \vec{F} , с которой магнитное поле действует на элемент проводника $d\vec{l}$ с током I , определяется по формуле Ампера

$$\vec{F} = I [d\vec{l} \vec{B}]. \quad (12)$$

Эта сила направлена перпендикулярно индукции в данной точке поля и перпендикулярна элементу тока $I d\vec{l}$ (рис. 1). Если индукция \vec{B} и элемент $d\vec{l}$ параллельны, то элемент тока не испытывает механического воздействия со стороны магнитного поля. Механическое воздействие магнитного поля на элемент тока максимально, когда \vec{B} и $d\vec{l}$ взаимно перпендикулярны.

Физическую сущность механического воздействия магнитного поля на ток рассмотрим на следующем примере. На рис. 2 показаны силовые линии: равномерного магнитного поля до введения в него провода с током; уединенного провода с током; результирующего поля. Слева от провода силовые линии собственного поля направлены навстречу силовым линиям внешнего равномерного поля, а справа — по направлению силовых линий этого поля. Поэтому результирующее поле слева от

провода разрежено, а справа — сгущено. Силовые линии, стремясь выпрямиться, производят давление на провод справа налево.

Взаимодействие поля с током происходит независимо от того, вследствие каких причин возникло магнитное поле: в результате протекания тока в проводе или как следствие протекания молекулярных микротоков в частицах, помещенных в магнитное поле.

У вещества, внесенного в магнитное поле, возникает более или менее согласованная ориентация элементарных токов, в результате чего появляется дополнительное магнитное поле, которое взаимодействует с внешним полем и изменяет его.

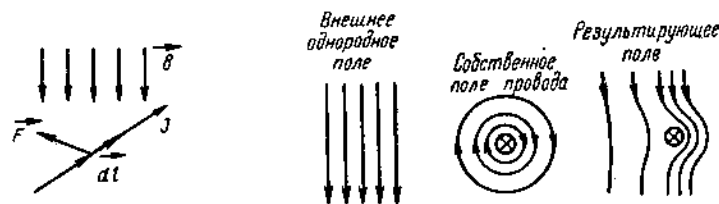


Рис. 1. Взаимодействие магнитного поля с электрическим током

Рис. 2. Изменение характера магнитного поля при внесении в него провода с током

Минеральные частицы, попадая в магнитное поле, также оказывают влияние на расположение его силовых линий. Магнитные частицы оказывают небольшое сопротивление магнитным силовым линиям (магнитному потоку) и поэтому последние в них концентрируются. Устремляясь по кратчайшему пути, они втягивают магнитные частицы в пространство между полюсами. Немангнитные частицы ухудшают проводимость, поэтому линии обходят их и выталкивают из поля.

Электрические и магнитные силы, проявляемые как механическое притяжение, называются *пондеромоторными*. Именно эти силы и представляют интерес как физическая основа для разделения минералов с различными электрическими и магнитными свойствами. Механические силы, возникающие в магнитном поле иногда называют *электродинамическими силами*, подчеркивая тем самым то обстоятельство, что под действием этих сил в системе часто возникает перемещение тел, т. е. динамический процесс.

Физическая сущность процесса магнитной сепарации состоит в том, что управляемое силовое магнитное поле искажает гравитационную траекторию минералов, обладающих соответствующими магнитными свойствами, чем вызывает их извлечение из потока других минералов, которые такими свойствами не обладают.

§ 3. Магнитные свойства руд и минералов

Для объяснения магнитных свойств вещества рассмотрим вначале сущность магнетизма, начав с атома. В соответствии с простейшей моделью атома вокруг атомного ядра по орбитам вращаются электроны. Например, вокруг ядра атома водорода вращается только один электрон, у гелия — два. У других элементов электроны образуют определенную систему, зависящую от порядкового номера элемента в периодической таблице Менделеева. При этом электронные орбиты расположены относительно ядра атома таким образом, что они образуют отдельные оболочки. Причем первая внутренняя оболочка может иметь не более двух электронов, вторая — не более восьми. Таким образом, электроны первых десяти элементов периодической системы Менделеева располагаются на этих двух оболочках. Третья оболочка имеет восемнадцать электронных мест.

Расширим представление о модели атома введением понятия подоболочки. Так, например, вторая оболочка состоит из двух, а третья — из трех подоболочек.

Каждой оболочке соответствует определенный энергетический уровень находящегося на ней электрона. Как правило, электроны стремятся занять вначале внутренние оболочки, обладающие более низкими энергетическими уровнями. Однако не у всех элементов внутренние оболочки заполнены полностью. Например, 26 электронов атома железа расположены на четырех оболочках так, что третья оболочка не заполнена полностью и содержит только 14 электронов, находящихся на третьей подоболочке; оставшиеся два электрона находятся уже на четвертой оболочке.

Какое влияние на магнитные свойства атома оказывают особенности электронной структуры, вызванные наличием незаполненных оболочек?

Предварительно рассмотрим магнитный момент отдельного атома, представив его как магнитный диполь, образованный тремя составляющими: моментом атомного ядра и магнитными моментами электронов — орбитального и спинового. Так как магнитный момент ядра значительно меньше магнитных моментов, создаваемых электронами, то ограничимся объяснением только двух последних составляющих. Напомним, что электроны вращаются по определенным орбитам вокруг атомного ядра и одновременно совершают спиновое движение, вращаясь вокруг собственной оси. Поскольку электроны являются носителями электрических зарядов, то при их вращении возникают орбитальный и спиновый магнитные моменты. Следовательно, магнитный момент электрона непосредственно связан с его вращением. В книге мы будем придерживаться упрощенной классической модели атома в виде волчка.

Рассмотрим действие приложенных внешних полей на магнитный момент атома. Всем элементам свойственен эффект прецессии Лармора, который объясняется неразрывной связью между магнитным и механическим моментами электрона. Аналогично механическому волчку, который под действием силы, перпендикулярной оси вращения, начинает совершать дополнительное движение, «атомный волчок» прецессирует вокруг направления внешнего поля. Это дополнительное движение создает магнитный момент, направление которого противоположно приложенному полю.

В природе имеются элементы, магнитные моменты атомов которых внешне себя не проявляют, что объясняется полной взаимной компенсацией отдельных орбитальных и спиновых моментов (все электронные орбиты заполнены). Тела из таких элементов в результате создания момента прецессии будут выталкиваться из неоднородного магнитного поля. Вещества, у которых проявляется подобный эффект, называются *диамагнетиками*.

Диамагнетизм является общим свойством атомов и молекул всех веществ без исключения и характеризуется отрицательной магнитной восприимчивостью, индуцируемой внешним магнитным полем. К таким веществам относятся медь, золото, серебро, цинк, ртуть, свинец, висмут, сурьма, углерод и др. У диамагнитных веществ отрицательная магнитная восприимчивость очень мала и практически не зависит от напряженности поля и температуры.

Выше мы упоминали об элементах, у которых внутренние оболочки заполнены электронами не полностью. У этих элементов отсутствует полная взаимная компенсация электронных моментов, вследствие чего результирующий магнитный момент их атомов не равен нулю. При отсутствии внешнего магнитного поля под действием теплового движения моменты (элементарные магнитики) ориентированы беспорядочно, и такие вещества ведут себя как диамагнетики.

Однако при наложении сильного внешнего поля магнитные моменты атомов вопреки тепловому движению ориентируются вдоль поля и вещество намагничивается. Такие вещества называют *парамагнетиками* и они втягиваются в сильное магнитное поле.

Магнитная восприимчивость этих веществ положительна и в отличие от диамагнетиков существенно зависит от температуры. К парамагнетикам относятся натрий, калий, магний, кальций, алюминий, олово, платина, кислород и др.

Рассмотрим *ферромагнитные* вещества, структура отдельных атомов которых аналогична структуре атомов парамагнетиков. Вследствие нескомпенсированных спиновых моментов у них создается слабый магнитный момент, однако в отличие от парамагнетиков в твердых ферромагнитных веществах между отдельными атомами существуют силы, противодействующие дезориенти-

рующему тепловому движению. Под действием этих сил магнитные моменты соседних атомов ориентируются параллельно друг другу и образуют элементарные объемы, спонтанно намагниченные до насыщения (домены). Магнитный момент домена в среднем в 10^{15} раз больше магнитного момента отдельного атома.

При воздействии внешнего магнитного поля происходит сильное намагничивание ферромагнитных веществ, обусловленное уже ориентацией не маленьких моментов отдельных атомов, как это имеет место у парамагнетиков, а целых доменов. Магнитная восприимчивость ферромагнетиков значительно больше восприимчивости парамагнетиков, так как вследствие больших значений моментов элементарных областей (доменов) для намагничивания требуются относительно слабые поля. Ферромагнетики отличаются от парамагнетиков также тем, что после удаления внешнего поля у них сохраняется частичная ориентация доменов и наблюдается явление остаточного намагничивания.

В современной физике различают также разновидности ферромагнетизма — *антиферромагнетизм* и *ферримагнетизм*. Антиферромагнетизм подобен ферромагнетизму, за исключением того, что ниже критической температуры (точка Нееля) атомные магнитные моменты ориентируются антипараллельно друг другу. Ферримагнетизм представляет собой случай нескомпенсированного антиферромагнетизма, когда элементарные магнитики занимают неравнозначные положения в кристалле, вследствие чего их антипараллельные магнитные моменты нескомпенсированы и создают заметный результирующий магнитный момент.

Для характеристики руд и минералов по магнитной восприимчивости с точки зрения их разделения в магнитном поле принята несколько иная классификация, которая отличается от приведенного их деления в физике. Распределение минералов по группам в соответствии с этой классификацией в известной степени условно, так как оно основано на возможности извлечения минералов в магнитную фракцию на современных магнитных сепараторах, на которых не извлекаются не только диамагнитные минералы, обладающие отрицательной магнитной восприимчивостью, но и некоторые парамагнитные минералы с очень малой удельной магнитной восприимчивостью ($\chi < 10 \cdot 10^{-9}$ м³/кг).

Ниже приводится классификация минералов по величине удельной магнитной восприимчивости χ и возможности их разделения на магнитных сепараторах. В соответствии с этой классификацией все минералы условно делятся на три группы:

1. Сильномагнитные минералы, имеющие удельную магнитную восприимчивость $\chi > 3000 \cdot 10^{-9}$ м³/кг. Эти минералы (магнетит, магхемит, пирротин и др.) относятся к ферромагнитным веществам и могут извлекаться в магнитную фракцию на сепараторах с относительно слабым магнитным полем напряженностью $70 \div 120$ кА/м.

2. Слабомагнитные минералы, имеющие удельную магнитную восприимчивость от $\chi \approx 10 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$ до $\chi \approx 600 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$. Эта наиболее многочисленная группа минералов соответствует парамагнитным веществам и включает все марганецсодержащие минералы, окислы железа, титана, вольфрама и ряд других минералов. Для извлечения этих минералов в магнитную фракцию напряженность магнитного поля сепараторов должна быть в пределах $480 \div 1600 \text{ кА/м}$.

3. Немагнитные минералы, к которым относятся парамагнитные минералы со значением удельной магнитной восприимчивости $\chi < 10 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$ и все диамагнитные минералы. Минералы этой группы не извлекаются в магнитную фракцию даже на сепараторах с сильным полем. С развитием техники получения сильных магнитных полей предельное значение удельной магнитной восприимчивости минералов этой группы может снижаться.

Если сильномагнитный образец поместить в магнитное поле и намагнитить, а затем отключить поле, то у образца сохранится остаточная намагниченность, для снятия которой потребуются напряженность магнитного поля противоположного направления той или иной величины. Эта величина характеризует *коэрцитивную силу* образца H_c . Чем выше коэрцитивная сила, тем труднее образец поддается размагничиванию. Ферромагнитные вещества с малым значением коэрцитивной силы называются магнитно-мягкими, а обладающие большой коэрцитивной силой — магнитно-жесткими. Первые применяются для изготовления сердечников электромагнитных систем сепараторов, а вторые — для изготовления постоянных магнитов.

Магнитные свойства сильномагнитных веществ, как правило, зависят от температуры. При определенной для каждого вещества температуре, называемой точкой Кюри, сильномагнитные свойства исчезают, и вещество становится парамагнитным.

Магнитное поле H_0 внутри сильномагнитного образца, помещенного во внешнее магнитное поле H , отличается от этого внешнего поля и зависит от формы образца

$$H_0 = H - H_p, \quad (13)$$

где $H_p = NI$ — размагничивающее поле образца;

N — коэффициент размагничивания, зависящий от формы образца и его расположения в магнитном поле.

Для бесконечно длинного стержня, ось которого совпадает с направлением напряженности H внешнего поля, $N = 0$, а для бесконечно тонкого диска, расположенного перпендикулярно направлению напряженности H , коэффициент размагничивания достигает своего максимального значения, равного 4π ; для шара $N = \frac{4\pi}{3}$.

Магнитные свойства слабомагнитных минералов в отличие от сильномагнитных не зависят от формы частиц и от напряженности намагничивающего поля. Значения удельной магнитной восприимчивости некоторых минералов приведены в приложении 2.

§ 4. Основные методы магнитных измерений

Для измерения магнитных характеристик поля и вещества применяются следующие основные методы.

Баллистический метод позволяет измерять индукцию магнитного поля и различные виды проницаемостей. Этот метод основан на измерении количества электричества, протекающего через витки обмотки, охватывающей образец. Количество электричества возникает в тот момент, когда магнитный поток резко меняется.

При измерении напряженности магнитного поля баллистическим методом используется катушка (зонд), каркас которой выполняется из изоляционного материала. На каркас наматывается несколько витков медной проволоки диаметром $0,05\text{—}0,8 \text{ мм}$, которые соединяются с баллистическим гальванометром и вторичной обмоткой эталонной катушки. Если измерительную катушку расположить таким образом, чтобы вектор напряженности магнитного поля был направлен перпендикулярно к плоскости витков, то при быстром удалении катушки из магнитного поля в ее витках возникает э. д. с., величина которой определяется числом витков катушки и изменением потока магнитной индукции, проходящего через площадь витков катушки. По показаниям стрелки гальванометра рассчитывается напряженность магнитного поля. Для измерения напряженности зонд помещается в пространство, где определяется напряженность поля, а затем быстро удаляется из этого пространства или поворачивается на 180° . Эталонная катушка при измерении должна находиться вне магнитного поля.

Магнитометрический метод позволяет определять намагниченность образца и петлю гистерезиса. Этот метод измерения магнитных свойств вещества основан на магнитном взаимодействии намагниченного образца и подвижной магнитной стрелки.

Намагниченность образца определяется по углу отклонения магнитной стрелки от своего первоначального положения. Прибор для измерения намагниченности образцов называется магнитометром. Основными частями магнитометра являются магнитная стрелка и подвижный магнит, имеющий форму цилиндра. Магнитная стрелка подвешена на нити из вольфрама, серебра или кварца толщиной $12\text{—}20 \text{ мкм}$ и длиной $150\text{—}300 \text{ мм}$. Нить крепится зеркальце, с помощью которого отсчитывают угол поворота стрелки.

Электродинамический метод позволяет определять индукцию и петлю гистерезиса. Данный метод основан на измерении угла поворота рамки с током, находящейся в магнитном поле намагниченного образца. Если катушку, выполненную в виде рамки подвесить в однородном магнитном поле на тонкой нити, то при пропускании через витки катушки тока она повернется на некоторый угол. По углу закручивания нити с известной константой упругости рассчитывают напряженность магнитного поля.

Пондеромоторный метод дает возможность измерять намагниченность, магнитную восприимчивость и другие магнитные характеристики. Этот метод основан на измерении силы действия магнитного поля на образец. Пондеромоторным методом пользуются при измерении магнитной восприимчивости слабых магнитных минералов (метод Гуи). По методу Гуи длинный цилиндрический образец подвешивается между полюсами электромагнита таким образом, что один его конец находится вне электромагнита, где напряженность поля очень мала, а другой располагается в области с максимальной напряженностью поля. На образец будет действовать сила, направленная вдоль его длины в сторону увеличения напряженности магнитного поля.

Для определения силы, действующей на исследуемый образец, можно использовать обычные аналитические или демпферные микровесы. Сила (метод Гуи) может достигать величины нескольких десятых долей грамма.

Если требуется измерить магнитную восприимчивость порошкообразных образцов, применяют стеклянные ампулы, заполненные исследуемым веществом.

Индукционный метод позволяет измерять индукцию, намагниченность, магнитную проницаемость. Этот метод основан на измерении электродвижущей силы индукции, которая возбуждается в обмотке, или на измерении реактивного сопротивления катушки, в которую помещен исследуемый образец.

Мостовые методы используются для определения индукции, магнитной проницаемости и магнитного сопротивления.

Ваттметрические методы применяются для измерения потерь на гистерезис и вихревые токи. В основу методов положено измерение с помощью ваттметра мощности, которая поглощается в цепи катушки, содержащей образец.

Калориметрические методы позволяют определять потери на гистерезис и вихревые токи. Эти методы основаны на измерении количества тепла, которое выделяется образцом при его перемагничивании в переменном магнитном поле.

Радиотехнические методы исследования магнитных свойств веществ дают возможность определять кривую индукции, петлю гистерезиса и потери на гистерезис и вихревые токи.

Нейтроннографический метод основан на явлении магнитного рассеивания нейтронов, возникающего в результате взаимодей-

ствия магнитного момента нейтрона с магнитным моментом вещества. Этот метод позволяет исследовать магнитную структуру ферро-, пара- и антиферромагнитных веществ.

§ 5. Магнитные поля сепараторов

Магнитное поле может быть однородным или неоднородным. В однородном поле напряженность в любой его точке одинаковая, в неоднородном — она монотонно увеличивается или уменьшается в одном направлении. На рис. 3, а показано однородное

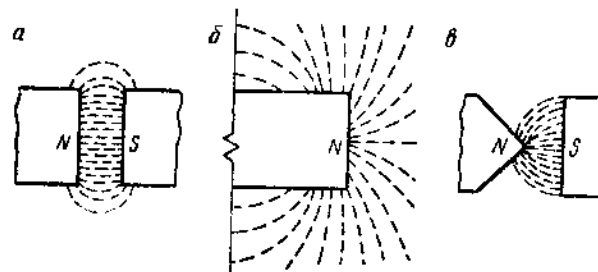


Рис. 3. Схемы образования магнитных полей:
а — однородное поле; б и в — неоднородные поля

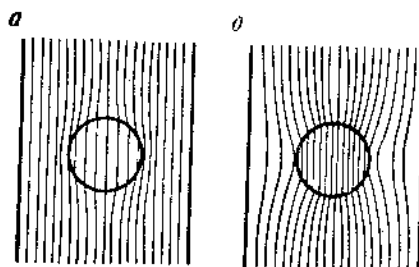


Рис. 4. Силовые линии магнитного поля в телах различной восприимчивости:
а — диамагнитное вещество; б — парамагнитное вещество

поле, на рис. 3, б и 3, в — неоднородные поля. В магнитных сепараторах применяются только неоднородные магнитные поля.

Если минеральную частицу поместить в магнитное поле, то при этом возможно, что плотность магнитных силовых линий внутри частиц, обладающих диамагнитными свойствами, будет меньше, чем в окружающем пространстве (рис. 4, а), а внутри парамагнитных и ферромагнитных частиц — больше, чем в окружающем пространстве (рис. 4, б). Однако этим еще не определяется поведение минеральных частиц в магнитном поле.

Какую форму должно иметь магнитное поле, чтобы можно было отделить парамагнитные или ферромагнитные частицы от практически немагнитных? Поведение какой-либо частицы в магнитном поле зависит от того, в какой степени она подвержена действию магнитной или механической силы, причем первая определяется главным образом двумя факторами: характеристикой магнитного поля и магнитной восприимчивостью частицы.

В однородном магнитном поле частицы подвергаются только воздействию вращающего момента, ориентирующего их параллельно силовым линиям поля. Однако перемещения частиц к полюсам магнитной системы не происходит. Для того чтобы переместить частицу в каком-либо направлении, необходимо иметь направленную магнитную силу, которая в соответствии с формулой (11) может быть получена только в неоднородном поле. Чем

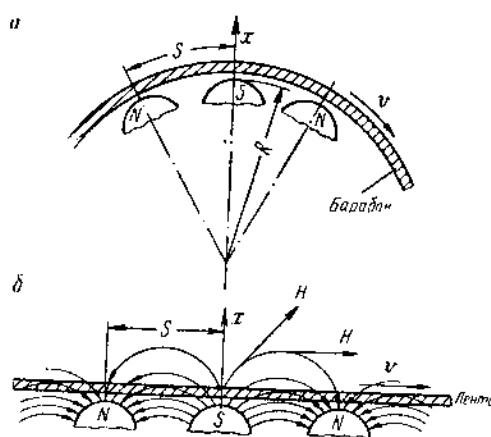


Рис. 5. Схемы расположения полюсов открытой многополюсной магнитной системы по цилиндрической поверхности (а) и в плоскости (б)

Для получения неоднородных магнитных полей применяются магнитные системы: открытые и замкнутые.

Открытые магнитные системы

Открытые магнитные системы имеют ряд полюсов, края которых могут быть расположены в плоскости или по цилиндрической поверхности (рис. 5). Такие системы применяются в сепараторах со слабым магнитным полем напряженностью до 240 кА/м (3000 Э) для сильномагнитных руд.

Расчет напряженности поля открытых магнитных систем на расстоянии x от поверхности полюсов может быть произведен по формуле

$$H = H_0 e^{-cx}, \quad (14)$$

где H — напряженность поля на расстоянии x от поверхности полюсов;

H_0 — напряженность поля непосредственно на поверхности полюса ($x=0$);

x — расстояние от поверхности полюсов;

e — основание натуральных логарифмов;

c — коэффициент неоднородности поля.

Знак минус в показателе степени указывает на уменьшение напряженности поля при удалении от полюса.

В случае расположения полюсных головок по цилиндрической поверхности (рис. 5, а) коэффициент неоднородности поля c равен

$$c = \frac{\pi}{S} + \frac{1}{R}, \quad (15)$$

где S — шаг полюсов магнитной системы;

R — радиус цилиндрической поверхности.

Когда $R \rightarrow \infty$, что соответствует расположению полюсных концов в плоскости (рис. 5, б),

$$c = \frac{\pi}{S}. \quad (16)$$

Коэффициент неоднородности поля c физически представляет собой градиент, приходящийся на единицу напряженности поля, и является функцией только шага полюсов магнитной системы S , а при расположении головок полюсов по цилиндрической поверхности — также и радиуса этой поверхности R . Коэффициент c является более удобным параметром для характеристики неоднородности поля, чем $\text{grad } H$, так как последний зависит не только от шага полюсов, но и от величины напряженности H поля.

При конструировании сепараторов с открытой магнитной системой важное значение имеет определение оптимального шага полюсов. С точки зрения уменьшения массы магнитной системы выгодно иметь минимальный шаг полюсов, однако при малом шаге полюсов слишком быстро падают напряженность и магнитная сила (рис. 6) с удалением от них [1]. Это снижает эффективность сепарации крупных частиц руды, которые могут оказаться в зоне с пониженной напряженностью поля и будут потеряны в немагнитном продукте. Однако при сепарации мелких частиц и малой толщине слоя руды, перемещаемом вблизи полюсов, можно получить достаточную магнитную силу и при малом шаге полюсов системы.

Определим оптимальный шаг полюсов открытой многополюсной системы при верхней (рис. 7, а) и нижней (рис. 7, б) подачах руды на барабан сепаратора.

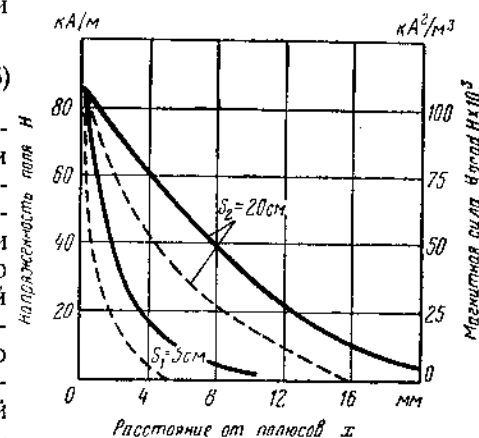


Рис. 6. Кривые $H = f(x)$ (сплошные линии) и $H \text{ grad } H = f(x)$ (пунктирные линии) при различном шаге S полюсов многополюсной магнитной системы

При обогащении кусковой руды на барабанном сепараторе необходимо иметь удельную магнитную силу $F_{\text{магн}}$, достаточную для извлечения магнитных кусков руды на расстоянии $x = 0,5d + \Delta$ при верхней подаче и $x = h + \Delta$ при нижней подаче руды на барабан.

Поскольку градиент поля является первой производной H по расстоянию x , то

$$\frac{dH}{dx} = cH_0 e^{-cx}, \quad (17)$$

а сила магнитного поля (сила магнита)

$$H \frac{dH}{dx} = cH_0^2 e^{-2cx}. \quad (18)$$

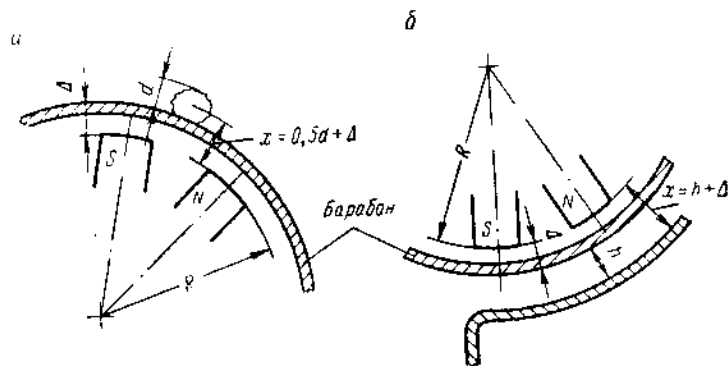


Рис. 7. Схематическое изображение магнитной системы барабана, руды или пульпы при верхней (а) и нижней (б) подаче питания

Удельная магнитная сила, действующая на магнитные куски руды, будет равна

$$F_{\text{магн}} = \mu_0 \chi H \frac{dH}{dx} = \mu_0 \chi c H_0^2 e^{-2cx}, \quad (19)$$

где H и $\frac{dH}{dx}$ — напряженность и градиент напряженности поля на расстоянии x от полюсов (см. рис. 5);

χ — удельная магнитная восприимчивость магнитных кусков руды;

μ_0 — магнитная постоянная.

Наибольшее значение магнитной силы достигается при условии, когда первая ее производная по c равна нулю, т. е.

$$\frac{dF_{\text{магн}}}{dc} = \mu_0 \chi H_0^2 e^{-2cx} (1 - 2cx) = 0, \quad (20)$$

принимая, что μ_0 , χ и H постоянны.

Равенство (20) будет иметь место, когда $1 - 2cx = 0$, откуда находим, что

$$c = \frac{1}{2x} = \frac{1}{d + 2\Delta}, \quad \text{м}^{-1} \quad (21)$$

и

$$c = \frac{1}{2(h + \Delta)}, \quad \text{м}^{-1}.$$

Для открытой многополюсной системы, полюсные концы которой расположены в плоскости, в соответствии с равенством (16) получим

$$S \approx \pi(d + 2\Delta) \quad (22)$$

и

$$S \approx 2\pi(h + \Delta),$$

а при расположении полюсных концов по цилиндрической поверхности радиусом R в соответствии с равенством (15) получим

$$S \approx \frac{\pi R(d + 2\Delta)}{R - (d + 2\Delta)}$$

и

$$S \approx \frac{2\pi R(h + \Delta)}{R - 2(h + \Delta)}. \quad (23)$$

Для нижней подачи руды на барабан при $R = 0,4$ м, $h = 0,01$ м и $\Delta = 0,01$ м

$$S = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,4(0,01 + 0,01)}{0,4 - 2(0,01 + 0,01)} \approx 0,14 \text{ м.}$$

Из равенств (22) и (23) видно, что шаг полюсов S должен быть тем больше, чем крупнее обогащаемый продукт и чем дальше от полюса он перемещается.

Расчеты показывают, что если принять силу магнита на поверхности полюса ($x=0$) за единицу, то при $x=0,125S$ сила магнита уменьшится в 2,1 раза, при $x=0,25S$ — в 5 раз, при $x=0,5S$ — в 23 раза и при $x=S$ — в 525 раз. Таким образом, разделяемые частицы следует располагать возможно ближе к поверхности полюсов (не далее чем $0,2S$).

На характеристику поля открытых магнитных систем кроме шага полюсов оказывают влияние ширина полюса, зазор между полюсами и конфигурация головки полюса.

Для оптимизации параметров открытой магнитной системы важно правильно выбрать отношение ширины полюса b к ширине зазора между полюсами a . На рис. 8 схематически изображены кривые изменения напряженности поля вдоль полюсного шага S при различном отношении $b : a$ [1, 2]. Из рис. 8 видно, что для получения магнитного поля с напряженностью, примерно одинаковой против середины полюсов и против середины зазоров между полюсами, это отношение должно быть близко к 1,5.

При конструировании открытых магнитных систем обычно выдерживают отношение $b : a = 1,2$. Лишь у систем из анизотропного феррита бария, обладающего большой коэрцитивной силой, отношение $b : a$ может быть больше (до 5:1), так как в этом случае направление потока задается при намагничивании полюсов и поэтому напряженность над зазорами не так резко возрастает.

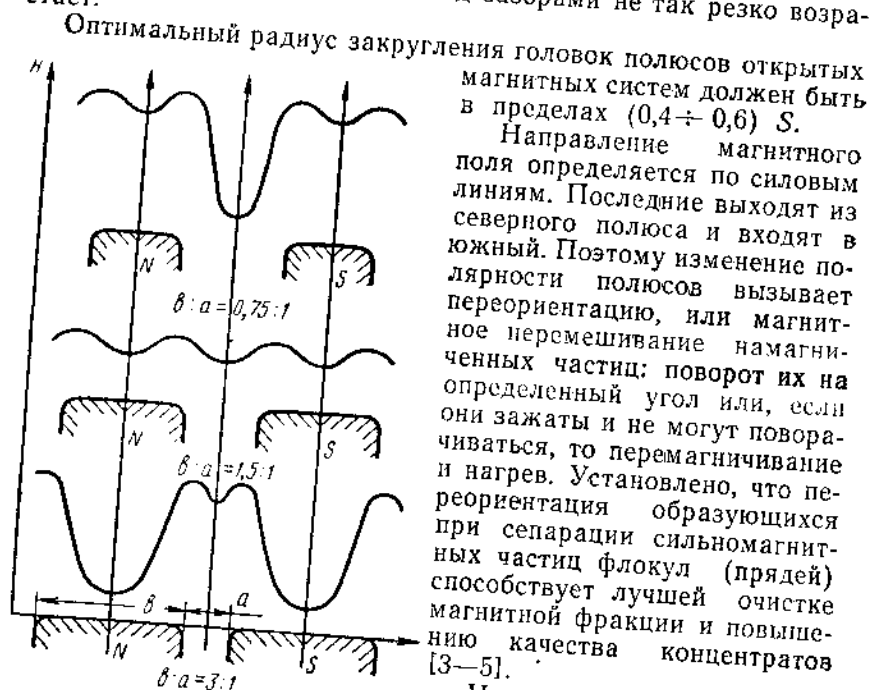


Рис. 8. Кривые изменения H поля вдоль полюсного шага при различном отношении ширины полюса b к ширине зазора между полюсами a

составлять всего несколько герц. Изменение направления поля при мокрой сепарации важно лишь до определенной крупности зерен (0,5—0,2 мм), ниже которой магнитно-мягкие пряди не персориентируются, а лишь перемагничиваются.

При магнитно-жестком материале переориентация флокул может принести не пользу, а вред: некоторые флокулы отрываются, приобретая ориентацию, обратную направлению магнитного поля. Это происходит в тех случаях, когда флокула направлена к соответствующему полюсу магнитной системы своим противоположным полюсом, а угол между вектором напряженности поля H и вектором индукции B флокулы равен 180° .

Увеличение интенсивности магнитного перемешивания дости-

гается при одновременном использовании постоянного и бегущего переменного полей. При этом создается так называемое пульсирующее магнитное поле.

Бегущее магнитное поле может создаваться обмоткой трехфазного тока или при перемещении барабана (ленты) относительно разноименных полюсов системы. Многополюсная система с обмоткой трехфазного тока создает синусоидальное бегущее поле при наложении трех синусоидальных полей, сдвинутых относительно друг друга на угол $\frac{2}{3}\pi$.

Сепараторы с переменным однофазным, пульсирующим и бегущим полями не получили широкого применения главным образом из-за низкой их производительности, хотя они и обеспечивают высокое качество продуктов разделения (особенно магнитной фракции).

Бегущее переменное магнитное поле низкой частоты (4—8 Гц) создается также при вращении барабана относительно многополюсной системы с чередующейся полярностью вдоль периметра барабана, однако вследствие низкой частоты поля при обычной скорости вращения барабана (1—2 м/с) происходит только переориентация магнитных прядей с разрывом наиболее длинных из них, что способствует частичному удалению из них немагнитных частиц.

Для сепараторов применяются также открытые многополюсные системы с чередованием полюсов вдоль оси барабана, но получаемые технологические показатели значительно ниже, чем у систем с чередованием полюсов вдоль периметра барабана [5].

Исследованиями установлено, что при мокром обогащении оптимальная частота изменения направления магнитного поля должна быть намного меньше, чем при сухом, и составлять всего несколько герц. Изменение направления поля при мокрой сепарации важно лишь до определенной крупности зерен (0,5—0,2 мм), ниже которой магнитно-мягкие пряди не персориентируются, а лишь перемагничиваются.

При магнитно-жестком материале переориентация флокул может принести не пользу, а вред: некоторые флокулы отрываются, приобретая ориентацию, обратную направлению магнитного поля. Это происходит в тех случаях, когда флокула направлена к соответствующему полюсу магнитной системы своим противоположным полюсом, а угол между вектором напряженности поля H и вектором индукции B флокулы равен 180° .

Увеличение интенсивности магнитного перемешивания дости-

Замкнутые магнитные системы

В замкнутых магнитных системах магнитное поле образуется в пространстве между двумя противопоставленными полюсами различной формы (рис. 9).

Такие системы применяются в сепараторах с сильным магнитным полем для слабомагнитных руд. Напряженность поля достигает 1600 кА/м (20 000 Э).

В магнитных системах сепараторов для слабомагнитных руд применяются сочетания следующих типов полюсов:

- плоского и противопоставленного ему закругленного полюсов (рис. 9, а);
- вогнутого и противопоставленного ему закругленного полюсов (рис. 9, б, в);
- плоского и противопоставленного ему многозубчатого полюсов (рис. 9, г, д, е);
- желобчатого и противопоставленного ему многозубчатого полюсов (рис. 9, ж).

Теоретическое определение напряженности магнитного поля и магнитной силы в зазорах, создаваемых различными

сочетаниями полюсов, связано с большими трудностями. Наиболее простая формула для характеристики поля в плоскости симметрии между плоским и клинообразным полюсами выведена А. Я. Соичевым и В. Г. Деркачем. При этом, учитывая перенасыщение острого края клинообразного полюса, он был заменен полюсом гиперболического сечения, острый край которого закруглен и асимптоты имеют точку пересечения на поверхности плоского полюса (см. рис. 9, а).

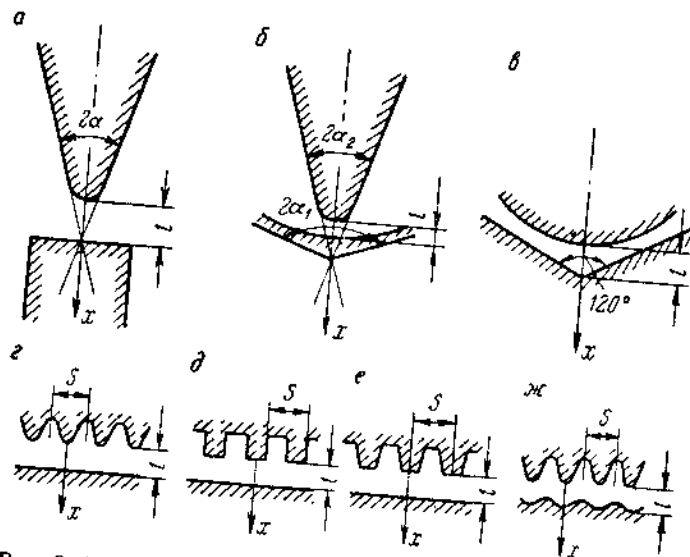


Рис. 9. Разновидности сочетания полюсов различной формы замкнутой магнитной системы

Напряженность поля в плоскости симметрии гиперболического полюса равна

$$H_x = \frac{H_0 l \sin \alpha}{\sqrt{l^2 - (l-x)^2 \cos^2 \alpha}} \quad (24)$$

где H_x — напряженность на расстоянии x от гиперболического полюса;
 H_0 — напряженность у гиперболического полюса ($x=0$);
 l — расстояние между полюсами;
 α — половина угла между асимптотами гиперболического полюса (см. рис. 9, а).

Сила магнитного поля $H \text{ grad } H$ при таком сочетании полюсов равна

$$H \text{ grad } H = \frac{H_0^2 l^2 (l-x) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{[l^2 - (l-x)^2 \cos^2 \alpha]^2} \quad (25)$$

Для характеристики напряженности и силы магнитного поля в пространстве между двумя гиперболическими полюсами (см. рис. 9, б) выведены следующие формулы [5]:

$$H_x = \frac{H_0 l \sin \alpha_2}{\sqrt{l^2 - (l \cos \alpha_2 - kx)^2}} \quad (26)$$

и

$$H \text{ grad } H = \frac{k H_0^2 l^2 \sin^2 \alpha_2 (l \cos \alpha_2 - kx)}{[l^2 - (l \cos \alpha_2 - kx)^2]^2} \quad (27)$$

где k — коэффициент, равный $\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1$;
 α_1 и α_2 — половины углов между асимптотами полюсов.

В пространстве между рассмотренными формами полюсов магнитное поле неоднородно как по напряженности H , так и по значению $H \text{ grad } H$. На рис. 9, в показаны полюса, в пространстве между которыми образуется поле с постоянным значением $H \text{ grad } H$ (изодинамическое поле). Для характеристики такого поля Г. Штейном были выведены формулы:

$$H_x = \frac{H_0}{\sqrt{1 - \frac{x}{l}}} \quad (28)$$

и

$$H \text{ grad } H = \frac{H_0^2}{2l} \quad (29)$$

Исследование магнитных полей между гладким и многозубчатым полюсами (см. рис. 9, г, д, е) показало, что для их характеристики на участке поля $x \leq 0,5S$ и в плоскости симметрии зубьев можно применять равенства [1]

$$H_x = \frac{0,5S H_0 \sqrt{1-c}}{\sqrt{0,25S^2 - c(0,5S-x)^2}} \quad (30)$$

и

$$H \text{ grad } H = \frac{0,25S^2 H_0^2 c (0,5S-x)(1-c)}{[0,25S^2 - c(0,5S-x)^2]^2} \quad (31)$$

где S — шаг зубьев многозубчатого полюса;
 H_0 — напряженность поля вблизи зубьев ($x=0$);
 c — коэффициент, зависящий от шага зубьев, который равняется от $\sim 0,3$ для $S \approx 1$ см до $\sim 0,6$ для $S \approx 3$ см.

Пример. Определить силу магнитного поля сепаратора для многозубчатого и плоского полюсов при $S = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $H_0 = 8 \cdot 10^5$ А/м, $c = 0,3$ и $x = 10^{-4}$ м. По формуле (31) находим

$$H \text{ grad } H = \frac{0,25 (3 \cdot 10^{-3})^2 (8 \cdot 10^5)^2 \cdot 0,3 (0,5 \cdot 3 \cdot 10^{-3} - 10^{-4}) \cdot (1-0,3)}{[0,25 (3 \cdot 10^{-3})^2 - 0,3 (0,5 \cdot 3 \cdot 10^{-3} - 10^{-4})^2]^2} \approx 1,53 \cdot 10^{14} \text{ А}^2/\text{м}^3.$$

Магнитное поле в плоскости симметрии зубьев между многозубчатым полюсом и полюсом с выемками (см. рис. 9, ж) приближенно можно рассчитывать по формулам (26) и (27), вводя в формулу (27) поправочный коэффициент, равный 0,7—0,8, учитывающий снижение силы магнитного поля за счет влияния соседних зубьев.

При магнитном обогащении слабомагнитных материалов наибольшее распространение получили сепараторы, магнитная система которых представляет сочетание многозубчатого полюса (валка) с различной формой зубьев и плоского или с выемками полюса (см. рис. 9, г—ж). Напряженность и сила магнитного поля в пространстве между полюсами такой формы, кроме числа ампер-витков системы, зависят главным образом от расстояния между полюсами, формы и шага зубьев.

Расстояние между полюсами у сепараторов с замкнутой магнитной системой выбирается в зависимости от крупности обогащаемой руды, магнитных свойств компонентов, которые необходимо извлечь в магнитную фракцию, толщины слоя материала, поступающего на разделение, и других параметров.

Расстояние между полюсами выбирается таким образом, чтобы обеспечить условия для разделения поступающего слоя материала на два потока, не мешающих друг другу при движении через межполюсное пространство. Необходимо учитывать, что с увеличением межполюсного расстояния при постоянном числе ампер-витков обмотки средняя напряженность поля падает и, как следствие, уменьшается сила магнитного поля. Высота рабочего зазора, как правило, устанавливается опытным путем. Она должна быть при крупнозернистом материале (3—4) d_{\max} , при мелкозернистом (15—20) d_{\max} и при тонкозернистом материале (100—150) d_{\max} , где d_{\max} — максимальный размер кусков руды [5].

При сочетании плоского и многозубчатого полюсов наиболее существенными факторами, влияющими на характеристику поля, являются шаг и форма зубьев многозубчатого полюса. В настоящее время отсутствуют четкие рекомендации по выбору оптимального шага и формы зубьев для любых конструкций сепараторов, так как характеристика руды, способ подачи ее в рабочую зону, содержание магнитных минералов в руде и ряд других факторов, очевидно, исключают возможность однозначного решения этой задачи.

Ниже приведены лишь результаты некоторых теоретических исследований по определению оптимального шага зубьев многозубчатого полюса, а также экспериментальные данные, полученные при разделении руд.

Теоретический расчет, проведенный Х. С. Ршоткой и В. И. Кармазиным [4], показал, что

$$S = \frac{h}{\sqrt{b\Delta F}} \quad (32)$$

где S — шаг зубцов многозубчатого полюса;
 h — расстояние между полюсами;
 ΔF — сила магнитного поля при сближении выступов зубьев в долях от ее наибольшего значения (при бесконечно большом шаге полюсов);
 b — коэффициент, зависящий от формы полюсов; например, для софокусных гипербол (см. рис. 9, б) $b = 0,605$.

Установлено, что при сухом магнитном обогащении допустимо уменьшение магнитной силы до 0,6 от ее наибольшего значения, т. е. допустимо $\Delta F = 0,6$, а при мокром обогащении — до 0,9, т. е. $\Delta F = 0,9$.

Исследования показали, что при сочетании плоского и многозубчатого полюсов магнитное поле неоднородно не на всем протяжении между полюсами, а только на участке, прилегающем к многозубчатому полюсу и равном примерно половине шага зубьев. В остальной же части поле близко к однородному. Установлено также, что увеличение шага зубьев вызывает рост неоднородности поля в зазоре между полюсами.

На напряженность поля и магнитную силу в зазоре между полюсами существенное влияние оказывает форма зубьев. Например, магнитная сила поля значительно выше при треугольном сечении зубьев по сравнению с зубьями прямоугольного сечения.

Характеристика поля при треугольном сечении зубьев зависит также от угла заострения и радиуса закругления краев зубьев. Результаты исследований показали, что наибольшего значения магнитная сила достигает при угле заострения зубьев, близком к 45° [1]. Уменьшение угла заострения зубьев при сохранении одного и того же шага влечет за собой увеличение их высоты и, как следствие, увеличение сопротивления магнитному потоку. И, наоборот, с увеличением угла заострения зубьев неоднородность поля падает, что также приводит к снижению магнитной силы.

Для того чтобы избежать магнитного насыщения зубьев и увеличения сопротивления магнитному потоку, края их закругляют по радиусу r , зависящему от шага зубьев. Радиус закругления r связан с шагом зубьев S выражением $r \approx 0,2S$.

С увеличением радиуса закругления зубьев напряженность поля вблизи плоского полюса возрастает, но в то же время она резко падает вблизи заостренных зубьев.

Значительное повышение напряженности магнитного поля обеспечивает гиперболическая форма полюсов, показанная на рис. 9, б. Такая форма полюсов позволяет также увеличить неоднородность и, следовательно, магнитную силу поля, так как в этом случае неоднородность поля будет создаваться обоими полюсами.

При разделении тонкозернистых минералов наряду с величиной магнитной силы важное значение имеет число центров притяжения магнитных минералов в рабочей зоне сепаратора (число зубьев вала), оказывающих влияние как на качество продуктов разделения, особенно магнитного продукта, так и на

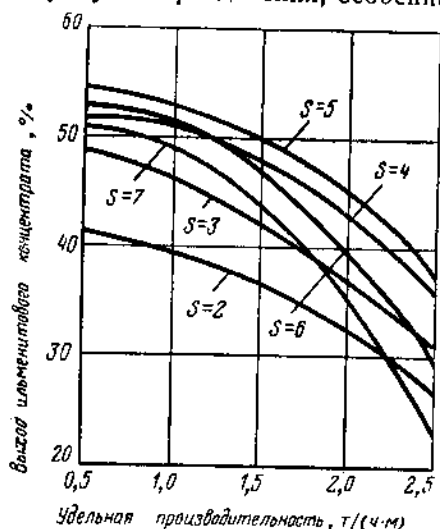
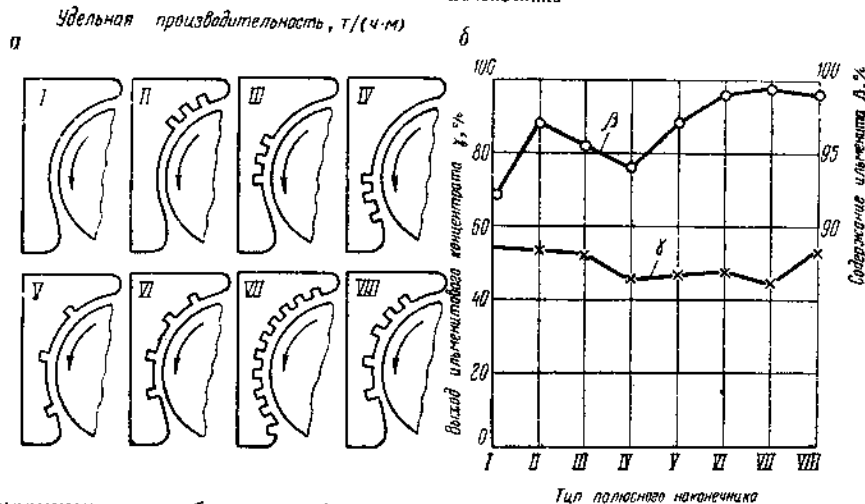


Рис. 10. Зависимость выхода γ ильменитового концентрата от удельной производительности вала при различном шаге S зубьев

Рис. 11. Влияние конфигурации межполюсного зазора на показатели магнитной сепарации:

a — типы полюсных наконечников; b — зависимость выхода γ и качества β ильменитового концентрата от типа полюсного наконечника



несущую способность зубчатых полюсов (валков), т. е. на производительность сепаратора.

На рис. 10 показана зависимость выхода магнитной фракции от удельной производительности при различном шаге зубьев вала, полученная при разделении ильменит-рутилового комплекса минералов крупностью менее 0,3 мм. С увеличением удельной нагрузки на валок выход магнитной фракции снижается, однако характер снижения различный для разных

расстояний между зубьями: более плавное снижение наблюдается при меньших и более резкое при больших расстояниях между зубьями. Отметим, что при уменьшении шага зубьев магнитное поле становится все более однородным, т. е. уменьшается магнитная сила, действующая на минералы.

Высокие технологические показатели сухой магнитной сепарации тонкозернистых слабомагнитных минералов получены при применении межполюсных зазоров, образованных сочетанием многозубчатого полюса (вращающегося вала) и полюсов с пазами, ориентированными перпендикулярно плоскости симметрии зубьев вала (рис. 11). Такая конфигурация межполюсного зазора была испытана на электромагнитном сепараторе, работающем в режиме удерживания магнитной фракции (верхнее питание).

Сочетание полюсов такой формы обеспечивает создание переменных по величине магнитных сил между полюсами, что способствует высвобождению из притянутого к зубьям вала продукта механически захваченных немагнитных частиц и, как следствие, повышению эффективности разделения минералов.

На рис. 11, a показаны варианты расположения пазов на полюсных наконечниках, а на рис. 11, b — показатели сепарации ильменит-рутиловой смеси. Наличие пазов и место их расположения на рабочей поверхности полюсных наконечников оказывают существенное влияние на показатели сепарации. Если пазы расположены только в нижней части полюсного наконечника (вариант IV), то качество ильменитового концентрата незначительно улучшается по сравнению с гладким полюсным наконечником (вариант I), а выход его значительно уменьшается. Это связано с тем, что на выходе из межполюсного зазора удерживаемый на валке продукт уже достаточно очищен от механически захваченных немагнитных минералов и уменьшение магнитных сил препятствует лишь притяжению к валку новых магнитных частиц.

Значительно повышается качество ильменитового концентрата и практически не снижается его выход при расположении пазов в верхней части полюсного наконечника (вариант II). Очевидно, в начальный момент образования слоя притянутых к зубьям вала частиц целесообразно периодически несколько раз ослабить поле, так как в это время происходит наиболее интенсивный захват немагнитных частиц. Ослабление поля после образования более толстого слоя материала на валке малоэффективно для очистки магнитной фракции (вариант III).

Наиболее высокие показатели сепарации получены при уменьшении сечения пазов и увеличении расстояния между ними в направлении перемещения материала через межполюсный зазор (вариант VIII). В этом случае наиболее полно соблюдаются условия для интенсивной очистки магнитной фракции в начале зоны притяжения и продолжается дальней-

шая очистка ее по мере прохождения через рабочую зону при постепенном уменьшении диапазона и частоты изменения магнитной силы. Такая геометрия рабочей поверхности полюсного наконечника обеспечила получение ильменитового концентрата с высоким содержанием ильменита (98,5—99%).

При сухой сепарации тонкозернистых слабомагнитных минералов были испытаны комбинированные магнитные поля, созда-

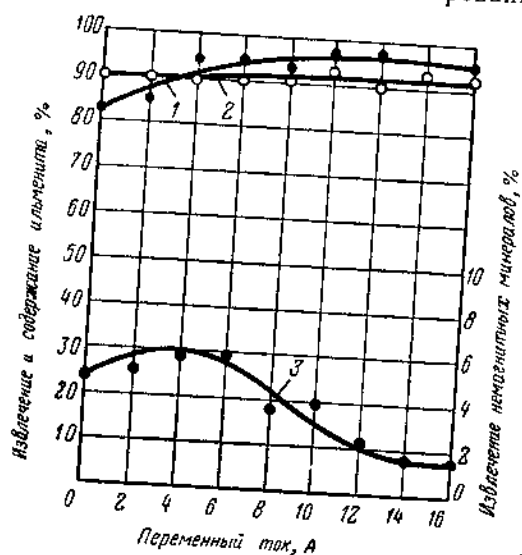


Рис. 12. Показатели магнитной сепарации при наложении на постоянное магнитное поле поля переменного тока:

1, 2 — извлечение ильменита и немагнитных минералов в магнитную фракцию; 3 — содержание ильменита в магнитной фракции

ваемые постоянным и однофазным переменным током промышленной частоты. Для процесса разделения в таких полях характерны «кипение» и вибрация материала, притянутого к зубьям валка. Это способствует лучшей очистке магнитной фракции от механически захваченных немагнитных частиц.

Испытания процесса сепарации ильменит-рутиловой смеси при наложении на постоянное поле электромагнитов магнитного поля переменного тока показали, что извлечение ильменита в магнитную фракцию возрастает на 10—12% и одновременно снижается засорение ее немагнитными минералами (рис. 12). Наилуч-

шая очистка магнитной фракции происходит почти при одинаковых значениях постоянного и переменного токов. Приведем определение рабочей зоны магнитного сепаратора и параметры, характеризующие эту зону. Рабочей зоной сепаратора называется участок, на котором происходит притяжение магнитных частиц к барабану (валку) сепаратора, их удержание и транспортирование. Рабочая зона сепаратора имеет зону притяжения магнитных частиц и зону их транспортирования. Зона притяжения характеризуется двумя параметрами: длиной и высотой. Длина зоны притяжения — это участок в направлении перемещения материала через рабочую зону, на котором происходит притяжение магнитных частиц к барабану (валку) под действием магнитной силы. Высота зоны притяжения определяется минимальным расстоянием между барабаном (валком) и дном ванны (открытая магнитная

система) или полюсным наконечником (замкнутая магнитная система).

Зоной транспортирования называется участок, на котором притяжения новых магнитных частиц не происходит, а осуществляется лишь транспортировка магнитного продукта к месту разгрузки и очистка его от механически захваченных немагнитных частиц.

Рабочая зона сепаратора характеризуется шириной питания, т. е. участком вдоль образующей барабана (валка), на который подается материал, подлежащий разделению.

У сепараторов с открытой магнитной системой длина и высота зоны притяжения могут быть достаточно большими, что позволяет применять их для обогащения руды крупностью до 100 мм. У сепараторов с замкнутой магнитной системой эти параметры значительно меньше, что объясняется трудностью создания интенсивного поля в большом объеме межполюсного пространства. Поэтому крупность обогащаемой руды на этих сепараторах обычно не превышает 5—6 мм.

§ 6. Динамика процесса магнитной сепарации

Сепарация в магнитном поле основана на различии в магнитных свойствах разделяемых минералов. Однако минералы при перемещении в магнитном поле сепаратора подвергаются воздействию не только магнитной силы, но и механических сил.

Для того чтобы разделить смесь минералов, различающихся по магнитным свойствам, должны одновременно соблюдаться следующие условия:

а) магнитная сила, действующая на более магнитные минералы, должна быть равна или больше равнодействующей всех механических сил, действующих на эти минералы в направлении, противоположном магнитной силе;

б) магнитная сила, действующая на менее магнитные минералы, должна быть меньше равнодействующей всех механических сил, действующих на эти минералы.

Эти условия выражаются следующим образом:

$$F'_{\text{мех}} < F'_{\text{магн}} > F''_{\text{магн}} < F''_{\text{мех}},$$

где $F'_{\text{магн}}$ — магнитная сила, возникающая в более магнитных минералах, извлекаемых в магнитную фракцию;

$F''_{\text{магн}}$ — магнитная сила, возникающая в менее магнитных минералах;

$F'_{\text{мех}}$, $F''_{\text{мех}}$ — равнодействующая механических сил, действующих на минералы, выделяющиеся в магнитную и немагнитную фракции.

Разделение руды в магнитном поле под влиянием магнитных и механических сил осуществляется в режиме извлечения магнитных минералов или в режиме их удерживания¹. Средой, в которой осуществляется разделение минералов, может быть вода или воздух. В соответствии с этим процесс называется мокрой или сухой магнитной сепарацией.

Сепарация в режиме извлечения

Руда подается под ленту, барабан или валок, и перемещение ее через рабочую зону сепаратора происходит по прямой или криволинейной траектории. Рассмотрим динамику процесса сухой магнитной сепарации при криволинейном перемещении руды через рабочую зону сепаратора (рис. 13).

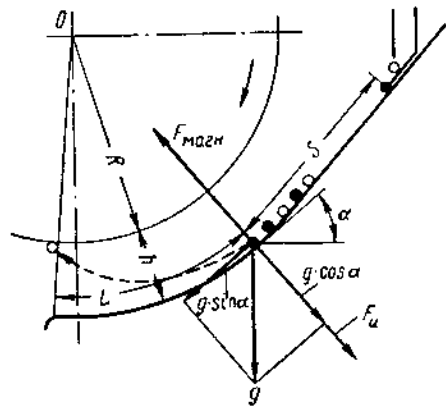


Рис. 13. Схема сил, действующих на частицу минералов в рабочей зоне сепаратора с нижней подачей питания (режим извлечения)

α — угол наклона плоскости (лотка);

сила трения руды о плоскость $f_{тр}$ (магнитные частицы под воздействием $F_{магн}$ отрываются от наклонной плоскости, поэтому для них $f_{тр}=0$);

центробежная сила $F_{ц}$, возникающая за счет кривизны питающего лотка.

Влияние последней силы на процесс разделения незначительно и ею можно пренебречь.

Обозначим: t_1 — время, за которое частица пройдет длину зоны притяжения L ; t_2 — время, за которое частица поднимется на высоту зоны притяжения h .

Если частица поступает в рабочую зону с начальной скоростью v_0 , то путь L , которой за время t_1 пройдет частица, составит

$$L = \frac{gt_1^2}{2} \sin \alpha + v_0 t_1. \quad (33)$$

Одновременно магнитная частица должна переместиться в направлении к полюсу на расстояние h :

$$h = \frac{F_1 t_2^2}{2}, \quad (34)$$

где $F_1 = F_{магн} - g \cos \alpha$ — дополнительная магнитная сила, которую нужно создать, чтобы магнитная частица была притянута к ленте или барабану в зоне действия магнитной системы.

Для того, чтобы магнитные частицы отделились от немагнитных, должно соблюдаться условие: $t_1 \geq t_2$. Принимая $t_1 = t_2 = t$ и решая систему равенств (33) и (34) относительно F_1 , находим

$$F_1 = \frac{h}{L^2} (v_0^2 + Lg \sin \alpha + v_0 \sqrt{v_0^2 + 2Lg \sin \alpha}). \quad (35)$$

Подставив в равенство (35) вместо F_1 его значение, получим

$$F_{магн} = g \cos \alpha + \frac{h}{L^2} (v_0^2 + Lg \sin \alpha + v_0 \sqrt{v_0^2 + 2Lg \sin \alpha}). \quad (36)$$

Правая часть равенства (36) представляет собой сумму основных механических сил (отнесенных к зерну с массой, равной единице): радиальной составляющей силы тяжести и силы инерции движущегося зерна.

Пример. Определим численные значения механических сил, действующих на магнитную частицу (ильменит) в начале зоны притяжения при сухой сепарации в режиме извлечения.

Исходя из необходимости обеспечения беспрепятственного перемещения зерен, примем угол наклона питающего лотка равным 45° . Значения остальных параметров принимаем следующие: $L = 0,05$ м; $h = 0,004$ м; $S = 0,2$ м (см. рис. 13); угол трения $\varphi = 38^\circ$.

Скорость частицы в начале зоны притяжения будет равна [1]

$$v_0 = \sqrt{\frac{2Sg \sin(\alpha - \varphi)}{\cos \varphi}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,2 \cdot 9,8 \sin(45^\circ - 38^\circ)}{\cos 38^\circ}} \approx 0,78 \text{ м/с.}$$

Удельная магнитная сила, действующая на зерно ильменита, должна быть равна (или больше) сумме основных механических сил:

$$g \cos \alpha = 9,8 \cos 45^\circ \approx 6,9 \text{ м/с}^2;$$

силы инерции движущегося зерна

$$\begin{aligned} & \frac{h}{L^2} (v_0^2 + Lg \sin \alpha + v_0 \sqrt{v_0^2 + 2Lg \sin \alpha}) = \\ & = \frac{0,004}{0,05^2} (0,78^2 + 0,05 \cdot 9,8 \sin 45^\circ + 0,78 \sqrt{0,78^2 + 2 \cdot 0,05 \cdot 9,8 \sin 45^\circ}) \approx \\ & \approx 2,9 \text{ м/с}^2. \end{aligned}$$

¹ В литературе встречаются также термины «верхнее питание» и «нижнее питание» сепараторов. Первый равнозначен термину «удерживание», второй — «извлечение».

Расчеты показывают, что при сепарации в режиме извлечения магнитных частиц значительная доля магнитной силы расходуется на преодоление силы тяжести частиц. Причем подъем магнитных частиц начинается при максимальном удалении их от зубьев вала. Поэтому обязательным условием успешной работы сепаратора в режиме извлечения является наличие сильного неоднородного магнитного поля во всем объеме рабочей зоны.

Исследованиями установлено, что извлечение магнитных частиц в значительной мере определяется длиной зоны притяжения L . С уменьшением длины зоны притяжения магнитная сила $F_{\text{магн}}$, необходимая для извлечения магнитных частиц, резко возрастает. В соответствии с равенством (36) при одном и том же значении $F_{\text{магн}}$ длина зоны притяжения L зависит от высоты рабочего зазора h и скорости перемещения материала.

Для следующих частных случаев равенство (36) принимает вид:

горизонтальное движение частиц ($\alpha=0^\circ$)

$$F_{\text{магн}} = g + \frac{2hv_0^2}{L^2}; \quad (37)$$

вертикальное движение частиц ($\alpha=90^\circ$)

$$F_{\text{магн}} = \frac{h}{L^2}(v_0^2 + Lg + v_0 \sqrt{v_0^2 + 2Lg}); \quad (38)$$

вертикальное движение частиц ($\alpha=90^\circ$) и $v_0=0$

$$F_{\text{магн}} = \frac{h}{L}g. \quad (39)$$

Рассматривая формулы (37—39), можно сделать вывод, что наименьшее значение необходимой удельной магнитной силы $F_{\text{магн}}$ получается при вертикальном движении частиц через рабочую зону сепаратора и начальной скорости $v_0=0$. Однако практическое использование этого способа перемещения частиц через рабочую зону сепаратора связано с большими трудностями, а качество продуктов сепарации низкое. Чаще всего применяется способ горизонтального перемещения руды через рабочую зону или питание подается самотеком по наклонному лотку. В случае горизонтального перемещения руды теоретическая допустимая скорость ее в рабочей зоне должна быть в соответствии с формулой (37) равна

$$v \leq L \sqrt{\frac{(F_{\text{магн}} - g)}{2h}}. \quad (40)$$

Как показали исследования, для приближенного определения необходимой удельной магнитной силы при подаче руды в рабочую зону сепаратора по лотку с небольшим наклоном (до $30-40^\circ$) можно также пользоваться формулой (37) [2].

Сепарация в режиме удерживания

Руда подается в верхнюю часть барабана и перемещение ее через рабочую зону сепаратора происходит по криволинейной траектории (рис. 14). На магнитное зерно при разделении в воздушной среде действуют следующие силы (отнесенные к зерну с массой, равной единице):

магнитная сила, нормальная к поверхности барабана

$$F_{\text{магн}} = \mu_0 \chi H \text{grad } H;$$

сила тяжести $f_{\text{т}}=g$, имеющая две составляющие: нормальную к поверхности барабана $f_{\text{н}}=g \cos \alpha$ и касательную к этой поверхности $f_{\text{к}}=g \sin \alpha$, где g — ускорение свободного падения и α — угол, определяющий положение частицы на поверхности барабана;

центробежная сила, нормальная к поверхности барабана $F_{\text{ц}} = \frac{v^2}{R}$, где v — линейная (окружная) скорость вращения барабана и R — радиус барабана.

Касательная составляющая силы тяжести $f_{\text{к}}$ может вызвать скольжение магнитного зерна относительно поверхности барабана и появление добавочной центробежной силы, для преодоления которой необходимо приложить добавочную удельную магнитную силу $\Delta F_{\text{магн}}$. Для того чтобы не допустить скольжения магнитного зерна относительно поверхности барабана или вала, величина добавочной магнитной силы должна быть равна [1]:

$$\Delta F_{\text{магн}} = \frac{g \sin \alpha}{\text{tg } \varphi},$$

где $\text{tg } \varphi$ — коэффициент трения зерна о поверхность барабана.

Величина удельной магнитной силы, необходимой для удерживания магнитных частиц на поверхности барабана, равна

$$F_{\text{магн}} = \frac{v^2}{R} - g \cos \alpha + \frac{g \sin \alpha}{\text{tg } \varphi}. \quad (41)$$

Формула (41) соответствует условиям движения единичного зерна по поверхности барабана, тогда как в действительности при работе сепаратора разделение происходит в слое руды, состоящем из магнитных и немагнитных зерен. В руде всегда содержится некоторое количество магнитных минералов

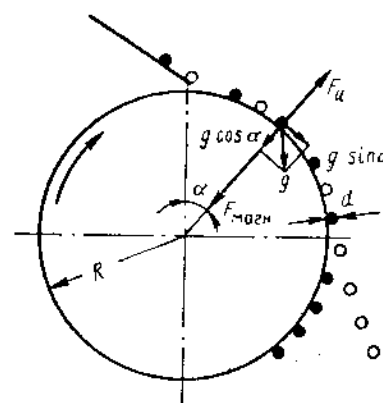


Рис. 14. Схема сил, действующих на частицы минералов в рабочей зоне сепаратора с верхней подачей питания (режим удерживания)

с повышенной удельной магнитной восприимчивостью, притягивающихся с относительно большей силой к вращающемуся барабану или валку, вследствие чего исключается сколько-нибудь значительное скольжение менее магнитных зерен по поверхности барабана под влиянием касательной составляющей силы тяжести f_k . Поэтому третьим членом формулы (41) можно пренебречь. Вследствие трения между магнитными и немагнитными зернами в слое руды затрудняется отделение последних от барабана, причем тем в большей степени, чем больше содержание магнитных зерен α_m [1, 2]. Это обстоятельство требует некоторого снижения удельной магнитной силы $F_{\text{магн}}$, которое учитывается поправочным коэффициентом b , вводимым в правую часть формулы (41) в качестве знаменателя. Для содержания магнитных минералов в руде $\alpha_m = 0,3-0,9$ (доли единицы) $b \approx 1 + \alpha_m$.

Следовательно, необходимая удельная магнитная сила для удерживания магнитных минералов может быть меньше величины, определяемой по формуле (41)

$$F_{\text{магн}} = \frac{1}{1 + \alpha_m} \left(\frac{v^2}{R} - g \cos \alpha \right). \quad (42)$$

Таким образом, основными механическими силами, определяющими величину удельной магнитной силы при сепарации в режиме удерживания, являются центробежная сила и сила тяжести зерна, причем при значениях угла α от 0 до 90° последняя уменьшает необходимую магнитную силу.

Центробежная сила в данном случае является важным параметром регулировки процесса, позволяющим эффективно воздействовать на качество продуктов сепарации.

При сепарации относительно крупной руды скорость вращения зерен диаметром d будет равна:

$$v_d = v \frac{R + 0,5d}{R},$$

так как $v_d = \omega(R + 0,5d)$ и $\omega = \frac{v}{R}$, отсюда формула (42) примет вид

$$F_{\text{магн}} = \frac{1}{1 + \alpha_m} \left(\frac{v^2 (R + 0,5d)^2}{R^3} - g \cos \alpha \right). \quad (43)$$

Из формулы (43) можно определить максимально допустимую частоту вращения барабана (валка) v_k

$$v_k = \frac{R}{R + 0,5d} \sqrt{R [(1 + \alpha_m) F_{\text{магн}} + g \cos \alpha]}, \quad (44)$$

$$F_{\text{магн}} = \mu_0 \chi H \text{ grad } H.$$

Пример. Рассчитать допустимую частоту вращения валка магнитного сепаратора при сепарации в режиме удерживания ильменито-рутиловой смеси для следующих условий: $R = 0,05$ м; $\alpha_m = 0,6$; $H \text{ grad } H = 1,53 \cdot 10^{14}$ А²/м³; χ ильменита = $5,9 \cdot 10^{-7}$ м³/кг; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м; $\alpha = 180^\circ$.

Пренебрегая размерами зерна ильменита, по формуле (44) находим

$$v_k = \sqrt{0,05 [(1 + 0,6) \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 5,9 \cdot 10^{-7} \cdot 1,53 \cdot 10^{14} + 9,8]} = 3,5 \text{ м/с.}$$

Допустимая частота вращения валка равна

$$N_k = \frac{30v_k}{\pi R} = \frac{30 \cdot 3,5}{3,14 \cdot 0,05} \approx 650 \text{ об/мин.}$$

Особенностью режима удерживания является то, что притяжение магнитных минералов происходит при максимальных значениях магнитных сил, чем обеспечивается интенсивное извлечение их уже в начале зоны притяжения. Условия притяжения оставшихся магнитных зерен также благоприятные, так как они движутся вертикально и для их отклонения и притяжения требуется минимум магнитной силы.

Таким образом, при сепарации в режиме удерживания появляется возможность вести процесс с максимальными абсолютными значениями разделяющих сил, что является одним из наиболее важных условий повышения эффективности сепарации. Возможно также ведение процесса сепарации при небольших значениях магнитных сил, что также представляет интерес с точки зрения повышения селективности разделения некоторых минералов и экономичности использования магнитных систем сепараторов.

При мокром магнитном обогащении на процесс разделения минералов оказывает влияние сопротивление среды, которое особенно значительно для тонких частиц. Сопротивление среды уменьшает скорость движения магнитных частиц в направлении действия магнитной силы, а немагнитных частиц — в направлении действия механических сил. Это снижает производительность сепаратора и ухудшает качество продуктов разделения. При вращении барабана или валка в водной среде вместе с магнитными увлекаются тонкие немагнитные частицы, находящиеся во взвешенном состоянии, причем тем в большей степени, чем выше частота вращения барабана или валка. В связи с этим приходится уменьшать частоту их вращения по сравнению с сухим магнитным обогащением, а это снижает производительность сепаратора.

При обогащении сильномагнитных руд сопротивление водной среды оказывает меньшее влияние на процесс разделения, чем при сепарации слабомагнитных руд, так как в первом случае происходит искусственное укрупнение частиц за счет магнитной флокуляции и сопротивление среды скорости перемещения таких флоккул уменьшается.

С увеличением сопротивления среды при мокрой магнитной сепарации магнитная сила, необходимая для извлечения магнитных минералов, должна быть увеличена. Степень этого увеличения зависит главным образом от крупности частиц. Например, для тонкозернистых частиц (меньше 0,2 мм) при мокром магнитном обогащении в режиме удерживания [см. формулу (41)] необходимая удельная магнитная сила равна

$$F_{\text{магн}} = \frac{v^2}{R} - g \frac{\delta - \Delta}{\delta} \cos \alpha + \frac{18\mu v_1}{d^2 \delta}, \quad (45)$$

где d — диаметр разделяемых частиц;
 δ и Δ — соответственно плотность магнитных частиц и среды;
 v_1 — скорость движения магнитных частиц к поверхности барабана или вала;
 μ — вязкость среды.

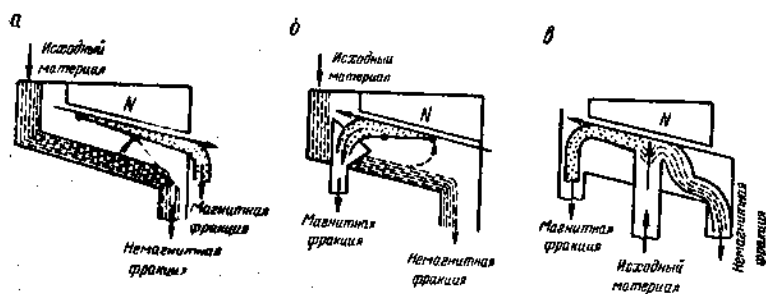


Рис. 15. Режимы магнитной сепарации:

а — прямоточный; б — противоточный; в — полупротивоточный

Последний член правой части выражения (45) представляет собой силу сопротивления среды скорости перемещения частицы, рассчитываемую по формуле Стокса. Как видно из формулы (45), сопротивление среды движущимся частицам быстро увеличивается с уменьшением их диаметра, и, следовательно, для их извлечения необходимо увеличивать удельную магнитную силу.

При мокром магнитном обогащении материала такой же крупности в режиме извлечения с горизонтальным перемещением частиц и начальной скоростью $v_0=0$ [см. формулу (37)] необходимая удельная магнитная сила для извлечения магнитных частиц равна

$$F_{\text{магн}} = g + \frac{18\mu v_1}{d^2 \delta}. \quad (46)$$

В зависимости от направления перемещения продуктов относительно друг друга различают следующие режимы сепарации (рис. 15):

прямоточный режим — продукты сепарации движутся в том же направлении, что и исходная руда (рис. 15, а);

противоточный режим — магнитная фракция движется в направлении, противоположном направлению движения исходной руды (рис. 15, б);

полупротивоточный режим — исходная руда, направляемая на магнит, разделяется на магнитную и немагнитную фракции, отклоняющиеся под прямыми углами в разные стороны (рис. 15, в).

Условия разделения при прямоточном режиме не обеспечивают полного извлечения магнитных зерен, поскольку менее магнитные зерна, притягиваемые магнитом с меньшей скоростью, должны притягиваться к уже образовавшемуся на нем слою более магнитных зерен, и в связи с этим возрастает вероятность их отрыва и попадания в немагнитный продукт.

Противоточный режим обеспечивает более благоприятные условия для извлечения магнитных зерен, так как менее магнитные зерна могут притягиваться к поверхности магнита, свободной от сильномагнитных зерен.

При полупротивоточном режиме направление движения исходного продукта совпадает с направлением магнитных сил, действующих на магнитные частицы, вследствие чего облегчается их извлечение.

Глава II

Магнитные сепараторы

§ 7. Классификация магнитных сепараторов

В Советском Союзе серийно выпускаются сепараторы двух типов: электромагнитные и с постоянными магнитами (ГОСТ 10512—70). Несмотря на конструктивные отличия магнитных систем и других узлов, все сепараторы делятся на две группы: 1) сепараторы со слабым магнитным полем (H от 70 до 120 кА/м и сила поля от $3 \cdot 10^5$ до $6 \cdot 10^5$ кА²/м³), предназначенные для выделения из руд сильномагнитных минералов; 2) сепараторы с сильным магнитным полем (H от 800 до 1600 кА/м и сила поля от $3 \cdot 10^7$ до $1210 \cdot 10^7$ кА²/м³), предназначенные для выделения из руд слабомагнитных минералов.

Другие признаки, по которым классифицируются сепараторы, связаны главным образом со свойствами обогащаемой руды или режимными параметрами процесса сепарации.

Так, в зависимости от крупности руды и содержания илистого материала сепарация может осуществляться в воздушной или водной среде и магнитные сепараторы подразделяются на сухие (условное обозначение С) и мокрые (условное обозначение М).

В зависимости от направления движения продуктов относительно друг друга, определяемого также свойствами сырья,

различают сепараторы с прямоточной, противоточной (П) и полупротивоточной (ПП) ваннами.

По конструктивному исполнению основного рабочего органа и характеру среды, в которой происходит разделение, сепараторы делятся на: барабанные для мокрой сепарации (БМ), барабанные для сухой сепарации (БС), валковые для мокрой сепарации (ВМ), валковые для сухой сепарации (ВС), дисковые для сухой сепарации (ДС).

Сепараторы выпускаются с замкнутыми и открытыми магнитными системами, а в случае выполнения последних многополюсными — с постоянной и чередующейся полярностью полюсов.

ГОСТ 10512—70 предусматривает условные обозначения сепараторов. Например, ПБМ-ПП-90/250 — барабанный сепаратор с постоянными магнитами для мокрой сепарации, с полупротивоточной ванной, с одним барабаном диаметром 900 мм и длиной 2500 мм;

4ПБС-63/200 — четырехбарабанный сепаратор с постоянными магнитами для сухой сепарации, диаметр барабанов — 630 мм, длина барабанов — 2000 мм;

4ЭВМ-38/250 — четырехвалковый электромагнитный сепаратор для мокрой сепарации с диаметром валков 380 мм и длиной 2500 мм.

Ниже приведено описание наиболее распространенных отечественных сепараторов для обогащения кусковых и тонкоизмельченных сильно- и слабомагнитных материалов.

§ 8. Сепараторы для мокрого обогащения сильномагнитных руд

В настоящее время при мокром магнитном обогащении сильномагнитных руд применяются барабанные сепараторы. Наибольшее распространение для обогащения тонкоизмельченных сильномагнитных руд получили сепараторы под шифром ПБМ (ГОСТ 10512—70).

Устройство и принцип работы этих сепараторов рассмотрим на примере сепаратора ПБМ-90/250 (209В-СЭ), разработанного институтом «Механобр» (рис. 16). Сепаратор состоит из барабана 1 с шестиполюсной магнитной системой 2, изготовленной из постоянных магнитов (сплав ЮНДК-24), ванны 4, загрузочной коробки 5, переливной коробки для смывной воды 3. Внешняя поверхность барабана покрыта резиной.

Привод сепаратора смонтирован внутри барабана, что облегчает замену последнего и увеличивает длительность его эксплуатации.

Сепаратор ПБМ-90/250 выпускается в трех исполнениях: с прямоточной, противоточной и полупротивоточной ваннами. Работает сепаратор следующим образом. Пульпа подается

под вращающийся барабан и перемещается через рабочую зону по криволинейной траектории. Магнитные минералы в зоне действия магнитной системы притягиваются к барабану и выносятся в концентратное отделение ванны. В месте разгрузки концентрата барабан смывается водой. Немагнитные минералы, пройдя через рабочую зону, разгружаются в хвостовое отделение ванны. Вывод продуктов из сепаратора осуществляется через выпускные отверстия с насадками, диаметр которых выбирается в зависимости от крупности питания и производительности сепаратора. Направление движения продуктов в зависимости от типа ванны показано на рис. 16.

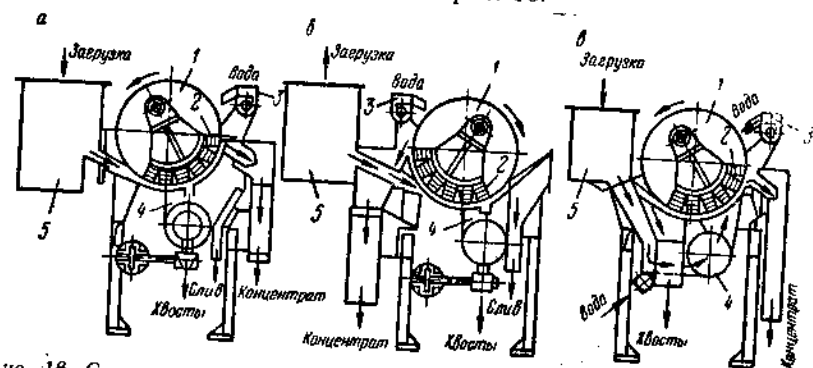


Рис. 16. Схемы сепаратора ПБМ-90/250:

а — с прямоточной ванной; б — с противоточной ванной; в — с полупротивоточной ванной

Напряженность магнитного поля на поверхности барабана этих сепараторов составляет 90—100 кА/м, на расстоянии 50 мм от поверхности барабана — 40—50 кА/м. Производительность в зависимости от типа ванны и характеристики сырья 40—200 т/ч.

Сепараторы предназначены для обогащения слива мельниц и классификаторов. Прямоточные сепараторы рекомендуется применять при крупности руды 6 мм и менее, противоточные — для руды крупностью 2 мм и менее, полупротивоточные — для руды крупностью 0,2 мм и менее. При высоком содержании магнитной фракции в питании и небольшом выходе хвостов (<30%) технологические показатели работы противоточных и полупротивоточных сепараторов выше показателей работы прямоточных сепараторов. При большом выходе хвостов (>50%) и необходимости перечистки магнитного продукта следует применять прямоточные сепараторы. Прямоточные сепараторы более надежны в работе и при прочих равных условиях потребляют мощность в 1,5—2 раза меньше, чем противоточные [6]. Полупротивоточные сепараторы по потребляемой мощности занимают промежуточное положение.

Технологические показатели обогащения железных руд на магнитных сепараторах со слабым полем

Марка сепаратора	Фабрика	Стадия обогащения и продукт	Производительность, т/ч		Питание			Магнитный продукт			Содержание железа в непродукте, %
			клас.	клас.	клас.	клас.	клас.	клас.	клас.		
ПБМ-90/250	Качканарского ГОКа	I (слив стержневой мельницы)	150—160	20—25	46—56	16,9	38,1	32,0	72,1	7,6	
ПБМ-П-90/250	То же	II (слив шаровой мельницы)	185—205	22—27	50—54	45,5	87,7	51,0	98,3	6,2	
ПБМ-ПП-90/250	»	III (слив гидроклона)	35—45	65—70	21—23	46,9	76,4	58,9	96,0	7,9	
167А-СЭ	СевГОКа	I (слив классификатора)	35	62	44	35,0	59,7	47,6	82,4	15,8	
26СВ	»	II (слив шаровой мельницы)	30	66	60	45,5	76,6	55,1	93,4	12,8	
167ПП-СЭ	НКГОКа	III (слив гидроклона)	10	90—95	25—27	60,4	92	64,6	98,6	11,7	
ПБМ-4ПА	ЮГОКа	I (слив классификатора)	110—130	50—54	48—51	36,1	71,5	45,5	90,2	12,4	
ПБМ-4ППА	»	III (пески дещлаатора)	30—40	93—96	25—27	63,4	97,3	64,7	99,3	15,9	

На обогатительных фабриках также широко применяются прямоточные барабанные сепараторы 167А-СЭ, противоточные сепараторы 26СВ и полупротивоточные сепараторы 167ПП-СЭ (с барабанами диаметром 600 мм и длиной 1500 мм), сепараторы ПБМ-4ПА и ПБМ-4ППА (с барабанами диаметром 800 мм и длиной 2500 мм). По устройству и принципу работы эти сепараторы во многом аналогичны описанным выше и отличаются от них внешним расположением привода, конструкцией магнитных систем и ванн.

В табл. 1 приведены технологические показатели обогащения железных руд различных месторождений на магнитных сепараторах со слабым полем [6].

Для регенерации ферромагнитных утяжелителей при обогащении руд и углей в тяжелых суспензиях применяются сепараторы ЭБМ-П-80/170 и ЭБМ-П-80/250 (ЭБМ-3 и ЭБМ-4).

Схема сепаратора ЭБМ-П-80/170 показана на рис. 17. Сепаратор состоит из ванны 1, барабана 2, электромагнитной системы 3, рамы 9, привода 10.

Ванна сепаратора противоточная и состоит из приемной камеры 14, питающего лотка 12 и отделений для концентрата 5, слива 7 и хвостов 8.

Сепаратор имеет электромагнитную систему секторной формы, состоящую из четырех электромагнитных блоков, закрепленных на неподвижной оси внутри барабана. Внутренняя полость барабана заполнена трансформаторным маслом.

Барабан приводится во вращение с помощью цепной передачи от привода, состоящего из электродвигателя, втулочно-пальцевой муфты и редуктора.

Для повышения извлечения магнитной фракции барабан сепаратора погружен в суспензию ниже своей оси, в связи с чем торцевые стенки ванны имеют специальные уплотнительные устройства, ограничивающие выход суспензии из ванны. Для отвода суспензии, проникающей через уплотнительные устройства, предусмотрено сливное отверстие, которое посредством штуцера и гибкого шланга 6 соединено с точкой сливного отделения 7.

Для предотвращения накопления крупных немагнитных частиц под барабаном в питающем лотке 12 имеется окно и

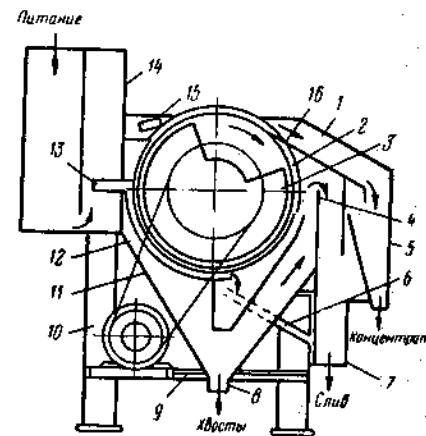


Рис. 17. Сепаратор ЭБМ-П-80/170

примыкающее к нему отстойное отделение 11, скорость потока в котором мала по сравнению со скоростью в хвостовом бункере. Все это позволяет удалять крупную породу и уголь из ванны сепаратора без потерь магнетита.

Принцип работы сепаратора заключается в следующем. Суспензия подается в приемную камеру ванны сепаратора, откуда по направляющему каналу 13 поступает на питающий лоток 12.

Под воздействием магнитного поля магнетит притягивается к поверхности барабана, вращающегося навстречу потоку суспензии, и выносится из суспензии.

Извлеченный магнетит транспортируется к отжимному скребку 15, где происходит обезвоживание концентрата до необходимой плотности. Разгрузка концентрата производится с помощью очищающего скребка 16, по которому концентрат направляется в концентратную течку 5.

Крупные немагнитные частицы через окно, имеющееся в питающем лотке, попадают в отстойное отделение 11 и вместе с хвостами разгружаются через отверстие 8 в нижней части ванны, а слив через порог 4 отводится из ванны сепаратора.

Катушки магнитной системы сепаратора соединены так, что их можно включать последовательно или параллельно, изменяя подаваемое напряжение, которое регулируется возбуждением генератора постоянного тока. Ток в одной обмотке может изменяться плавно от 0 до 20 А.

Наличие электромагнитной системы у этих сепараторов вместо постоянных магнитов обеспечивает получение на расстоянии 50 мм от поверхности барабана напряженности поля 80 кА/м, и, следовательно, более высоких технологических показателей по сравнению с сепараторами, имеющими постоянные магниты. Сепаратор ЭБМ-П-80/170 можно применять также для обогащения частично окисленных железных руд.

Сепаратор ЭБМ-П-80/250 имеет то же назначение и принцип работы, что и сепаратор ЭБМ-П-80/170. Отличается он от сепаратора ЭБМ-П-80/170 увеличенной длиной барабана.

Техническая характеристика сепараторов для мокрого магнитного обогащения сильномагнитных материалов приведена в приложении 3.

§ 9. Сепараторы для сухого обогащения сильномагнитных руд

Для сепарации крупнокусковой магнетитовой руды крупностью более 10 мм применяется сепаратор 4ПБС-63/200 (189А-СЭ), разработанный институтом «Механобр» (рис. 18). Сепаратор с верхним питанием и состоит из двух пар вращающихся барабанов 1, внутри которых размещены магнитные системы, изготовленные из постоянных магнитов (сплав

ЮНДК-24). Верхняя пара барабанов имеет пятиполюсную магнитную систему 2, а нижняя — трехполюсную 3. Полярность магнитных систем сепаратора чередуется по периметру барабана, что обеспечивает магнитное перемешивание руды. Магнитные системы фиксируются в определенном положении и остаются в процессе работы сепаратора неподвижными. Барабаны изготовлены из немагнитного материала и крепятся на

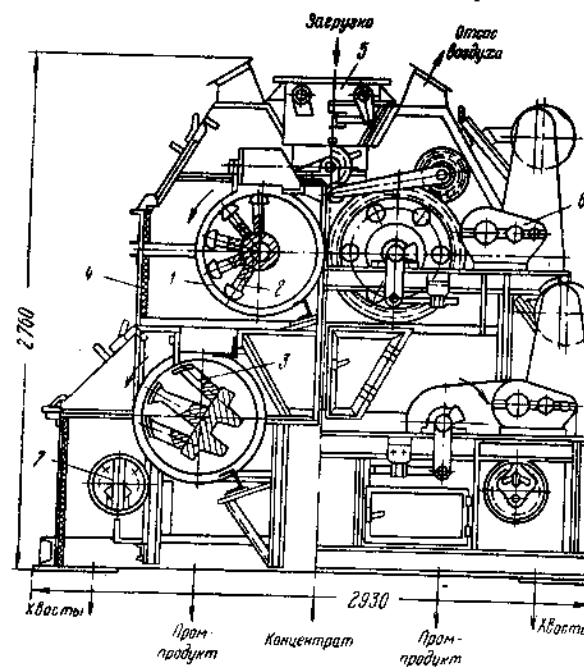


Рис. 18. Сепаратор 4ПБС-63/200

раме 4 с кожухом. Сепаратор оборудован приемной коробкой 5 с распределителем руды по верхним барабанам. Распределитель (металлическая площадка, закрепленная на валу и поворачиваемая приводным механизмом) обеспечивает подачу руды поочередно на левый и правый барабаны. Привод 6 каждого барабана индивидуальный и состоит из электродвигателя и редуктора. Привод верхних барабанов позволяет ступенчато регулировать частоту их вращения в пределах 50—100 об/мин и таким образом изменять качество и выход магнитной фракции. Частота вращения нижних барабанов изменяется в пределах 30—50 об/мин.

Работа сепаратора осуществляется следующим образом. Исходное питание из приемной коробки поступает на верхнюю пару барабанов, где получают магнитный продукт (концентрат) и первичный промпродукт.

Магнитный продукт выводится из сепаратора, а первичный промпродукт поступает на нижнюю пару барабанов, где происходит разделение на немагнитный продукт (отвалыные хвосты) и промпродукт. Выход этих продуктов регулируется положением шибера 7.

Напряженность магнитного поля у поверхности верхних барабанов 80—90 кА/м, у поверхности нижних — 110 кА/м. Производительность сепаратора на руде крупностью — 50+ +0 мм достигает 400—500 т/ч, что дает возможность сопрягать его непосредственно с дробилками среднего дробления. Сепаратор компактен и удобен при обслуживании.

Сухая магнитная сепарация мелкого сильномагнитного материала в отечественной практике обогащения применяется недавно. Однако исследования метода сухого обогащения мелкой магнетитовой руды на быстроходных барабанных сепараторах показали, что благодаря разрушению прядей из магнитных частиц имеется возможность получать не только отвалыные хвосты, но и высококачественные магнитные концентраты.

Для сухой сепарации мелкого сильномагнитного материала институтом «Механобр» разработан сепаратор ПБСЦ-63/50 (206Б-СЭ). На рис. 19

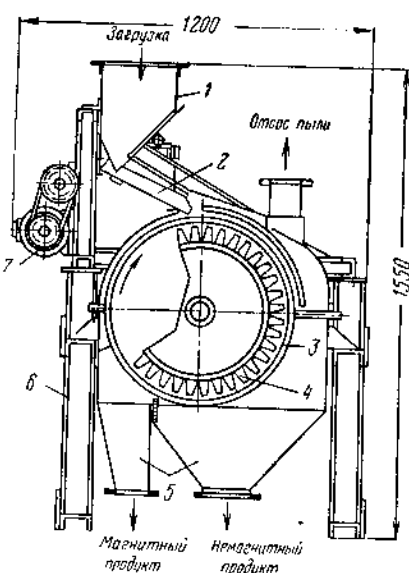


Рис. 19. Сепаратор ПБСЦ-63/50

показана схема сепаратора, включающего питающий бункер 1, виброток 2, барабан 3, неподвижную магнитную систему 4, с чередующейся полярностью полюсов по периметру барабана, приемные бункера 5, привод вибротокка 7. Все узлы сепаратора крепятся на раме 6.

Обечайка барабана сепаратора выполнена из немагнитной нержавеющей стали толщиной 1,2—2 мм, постоянные магниты изготовлены из сплава ЮНДК-24. Полюса установлены с шагом 50 мм. Напряженность магнитного поля у поверхности барабана составляет: против середины полюсов 115—125 кА/м, против зазора между полюсами 84—92 кА/м.

Работает сепаратор следующим образом. Исходная руда с помощью вибротокка подается в верхнюю часть барабана. Магнитная фракция притягивается к поверхности барабана и разгружается в бункер для магнитного продукта в тот момент,

когда участок барабана выходит из зоны действия магнитной системы. Немагнитная фракция транспортируется барабаном и разгружается в бункер для немагнитного продукта.

Быстроходный режим вращения барабана (300 об/мин) при малом шаге полюсов магнитной системы создает бегущее магнитное поле, частота которого равна 90 Гц. При этом происходит разрушение прядей и флокул из магнитных частиц и отделение свободных рудных зерен от сростков.

При обогащении мелкой магнетитовой руды на этих сепараторах выделяются отвалыные хвосты, готовый концентрат и промпродукт, поступающий на доизмельчение и повторное мокрое магнитное обогащение. При сухом обогащении руды резко сокращается количество материала, поступающего на тонкое измельчение и обогащение.

Сепаратор ПБСЦ-63/50 применяется для удаления из слабомагнитных руд сильномагнитных примесей перед их сухим обогащением на сепараторах с сильным магнитным полем.

В настоящее время разработаны сепараторы ПБСЦ-63/100 и ПБСЦ-63/200, аналогичные по конструкции сепаратору ПБСЦ-63/50, но имеющие большую длину барабана.

Технологические показатели обогащения железных руд на магнитных сепараторах 4ПБС-63/200 и ПБСЦ-63/50 приведены в табл. 2 [6]. Техническая характеристика сепараторов для сухой магнитной сепарации сильномагнитных руд приведена в приложении 4.

Таблица 2
Технологические показатели обогащения железных руд
на сепараторах 4ПБС-63/200 и ПБСЦ-63/50

Марка сепаратора	Фабрика	Продукт	Питание			Магнитный продукт			
			Производительность, т/ч	Крупность, мм	Содержание железа, %	Выход, %	Содержание железа, %	Извлечение, %	Содержание железа в немагнитном продукте, %
4ПБС-63/200	Соколовско-Сарбайского ГОКа	Дробленая руда после грохочения	400—500	—40+0	47,3	86,0	51,5	93,7	21,6
ПБСЦ-63/50	Оленегорского ГОКа	Концентрат	8	19,4% класса —0,074 мм	62,1	61,6	69,7	69,2	49,8
ПБСЦ-63/50	ЮГОКа	Руда	6	38,9% класса —0,074 мм	38,9	49,0	61,0	76,9	17,7

§ 10. Сепараторы для мокрого обогащения слабомагнитных руд

Мокрая магнитная сепарация в сильных магнитных полях слабомагнитных руд получила широкое распространение. В настоящее время этот процесс осуществляется в основном на валковых сепараторах различной конструкции, работающих в режиме извлечения магнитных минералов (нижнее питание).

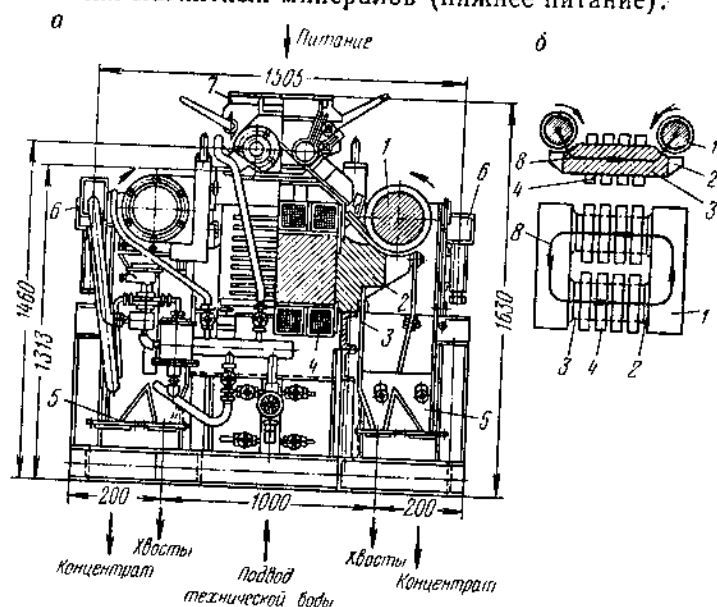


Рис. 20. Сепаратор 2ЭВМ-30/100:
а — устройство сепаратора; б — схема магнитной системы
Направление магнитного потока системы показано стрелками

Ниже приведены наиболее распространенные сепараторы с сильным магнитным полем. На рис. 20 показана схема двухвалкового электромагнитного сепаратора 2ЭВМ-30/100 (ЭРМ-1), который является усовершенствованной конструкцией сепаратора 2ВК-5В. Сепаратор состоит из двух валков 1 (для увеличения длины зоны сепарации диаметр валков увеличен с 270 до 300 мм), четырех полюсных наконечников 2, двух сердечников 3 с обмотками возбуждения 4, загрузочного устройства 7, правой и левой приемных ванн 5, коробок для переливания пульпы 6. Магнитная система О-образной формы (рис. 20, б) расположена горизонтально и включает в себя два валка, два сердечника с полюсными наконечниками и обмотки возбуждения. Направление магнитного потока системы показано стрелками 8.

Валки имеют зубья гиперболического профиля с шагом 32 мм, соосно с которыми в полюсных наконечниках имеются

выемки (углубления), усиливающие неоднородность магнитного поля. При этом магнитная сила поля направлена от полюсного наконечника к валку. Полюсные наконечники имеют продольные отверстия (щели), расположенные против зубьев валка. Номинальный зазор между ребром валка и впадиной полюсного наконечника равен 8—9 мм.

Валки, сердечники и полюсные наконечники изготавливаются из малоуглеродистой стали. Привод каждого валка индивидуальный и состоит из электродвигателя, текстурной передачи, червячного редуктора и кулачковых муфт.

Ванны сепаратора изготовлены из немагнитного материала и разделены на хвостовое и концентратное отделения. Ванны снабжены переливным порогом и регулируемым выпускными отверстиями для разгрузки хвостов и концентрата.

Загрузочное устройство сепаратора состоит из двухбарабанного питателя и лотков с шиберами, позволяющими регулировать толщину слоя рудной пульпы, направляемой в рабочий зазор.

Работает сепаратор следующим образом. Питание в виде пульпы распределяется из загрузочного устройства на оба валка сепаратора. Магнитные зерна руды из пульпы притягиваются к зубьям вращающихся валков и, выйдя из зоны действия магнитного поля, разгружаются в концентратный отсек ванны. Немагнитные зерна движутся по зазору между полюсным наконечником и валком и, достигнув щелей в полюсных наконечниках, разгружаются в хвостовой отсек.

При работе сепаратора ванна заполняется пульпой, избыток которой уходит через сливной порог. Постоянный уровень пульпы в ваннах поддерживается при помощи соленоидного клапана.

Система водоснабжения сепаратора состоит из коллектора и разводящих труб. Свежая вода подается в концентратное и хвостовое отделения ванны, в брызгала лотков питателя и для смыва валков.

Сепаратор 4ЭВМ-30/100 (ЭРМ-2) (рис. 21) представляет собой как бы два сепаратора 2ЭВМ-30/100, установленных друг над другом, но объединенных общей и более мощной магнитной системой (магнитодвижущая сила обмотки сепаратора составляет 8500 ампер-витков). Нижние валки сепаратора предназначены для пересортировки немагнитной фракции, поступающей с верхних валков. Сепаратор состоит из четырех валков 4 диаметром 300 мм и электромагнитной системы, включающей шестнадцать намагничивающих обмоток 2, два сердечника 3, восемь полюсных наконечников 5. Одновалковый питатель 1 снабжен шиберами, при помощи которых регулируется количество подаваемой в сепаратор пульпы. Ванны 10 сепаратора изготавливаются из немагнитного материала и их конструкция позволяет получать три продукта — немагнитную и магнитные фракции с верхних и нижних валков. В нижней части ванны снабжены

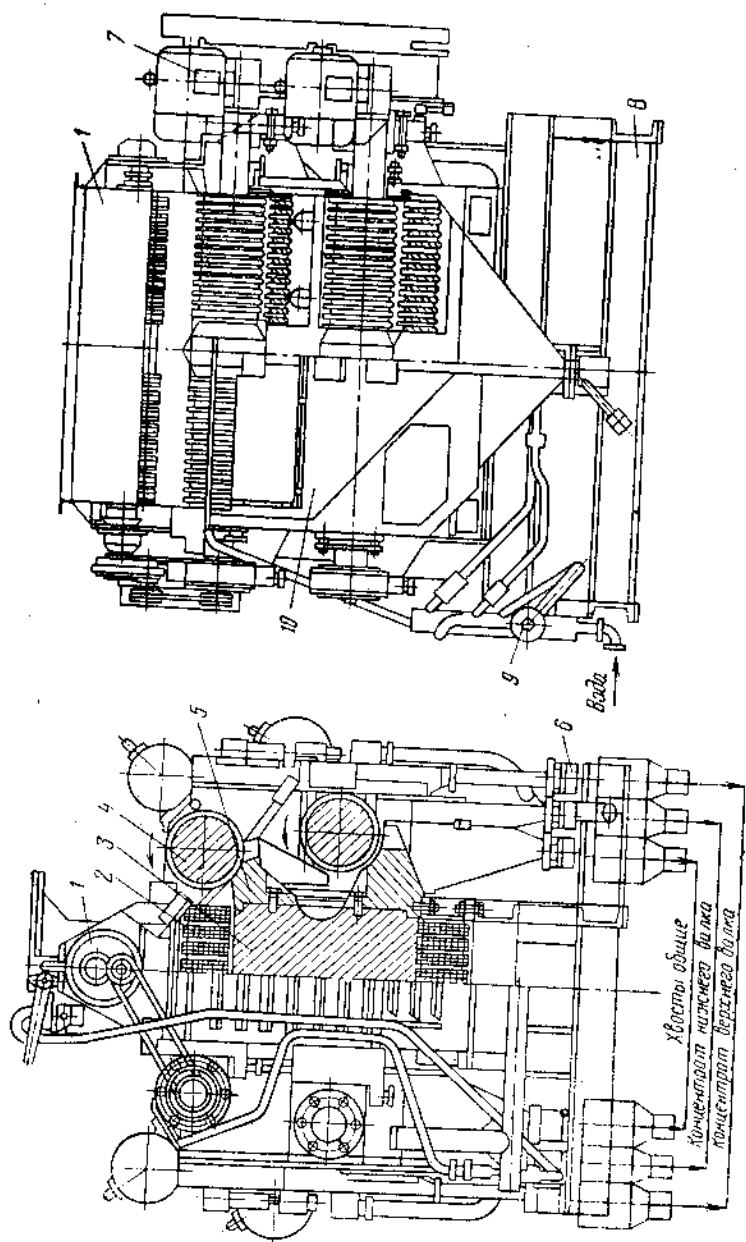


Рис. 21. Сепаратор 4ЭВМ-30/100

разгрузочными насадками 6. Привод 7 каждого валка индивидуальный и состоит из электродвигателя, навесного цилиндрического редуктора, насаженного непосредственно на цапфу валка, и клиноременной передачи. Водоснабжение сепаратора осуществляется от коллектора 9 при помощи разводящих труб и соединительных шлангов. Все узлы сепаратора крепятся на раме 8, изготовленной из стальных швеллеров.

Принцип работы сепаратора 4ЭВМ-30/100 аналогичен сепаратору 2ЭВМ-30/100, с той разницей, что в первом совмещены основная и пересортичная операции. Совмещение в одной машине этих операций позволяет снизить потери магнитной фракции в хвостах и удельный расход технической воды.

Опыт эксплуатации сепараторов 4ЭВМ-30/100 на марганцевых рудах показал, что они обеспечивают высокие технологические показатели, однако повышения производительности в одном агрегате не достигнуто [3]. Причиной этому является одинаковая ширина питания по сравнению с сепаратором 2ЭВМ-30/100, а также неэффективное использование нижних валков, которые оказываются недогруженными за счет выделения из исходной руды концентрата в первой стадии.

Для повышения производительности процесса сепарации был разработан электромагнитный сепаратор 2ЭВМ-38/250 (ЭРМ-3). В этом сепараторе впервые применены валки с рабочей длиной 2500 мм вместо 1000. На рис. 22 показана схема устройства сепаратора.

Сепаратор состоит из двух валков 2 и электромагнитной системы, включающей шестнадцать катушек возбуждения 1, надетых на четыре сердечника 3, и восемь полюсных наконечников 4. Сепаратор имеет два питателя 7 (сварные корпуса), снабженные шиберами для регулировки производительности, приемные ванны 5, изготовленные из немагнитного материала (нержавеющая сталь), и привод 8, включающий электродвигатель, навесной редуктор и клиноременную передачу. Система водоснабжения сепаратора состоит из коллектора 6, распределительных шлангов и пробковых кранов. Рама сепаратора 9 изготовлена комбинированной из магнитных и немагнитных материалов с целью уменьшить рассеяние магнитных потоков.

Электромагнитная система сепаратора 2ЭВМ-38/250 имеет три замкнутых контура магнитного потока, расположенных в одной плоскости. Каждый валок сепаратора имеет четыре рабочие зоны, расположенные по его длине.

Процесс сепарации осуществляется так же, как и в сепараторе 2ЭВМ-30/100. На сепарацию подается пульпа с содержанием 50—70% твердого и при помощи питателей равномерно распределяется по длине валков. Магнитная фракция притягивается к зубьям вращающихся валков и выносится за делительную перегородку в концентратное отделение ванны, а немагнитная

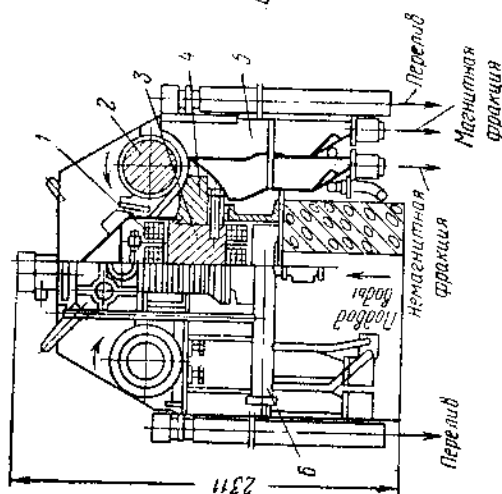
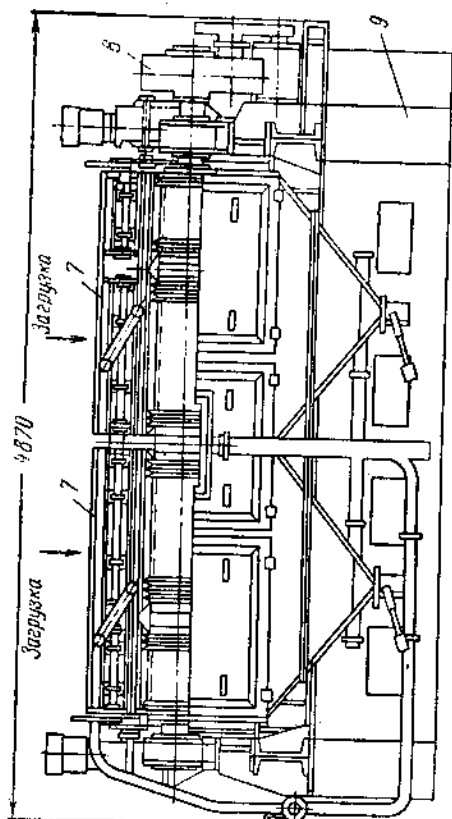


Рис. 22. Сепаратор 2ЭВМ-38/250

фракция перемещается через рабочий зазор и под действием собственного веса разгружается через щели в полюсных наконечниках в хвостовое отделение ванны.

На рис. 23 показан электромагнитный сепаратор для мокрого магнитного обогащения слабомагнитных материалов — 4ЭВМ-38/250 (ЭРМ-4). Этот сепаратор по конструкции и принципу работы во многом похож на сепаратор 4ЭВМ-30/100 и отличается от последнего увеличенными длиной и диаметром валков (соответственно 2500 и 370 мм вместо 1000 и 300 мм), а также

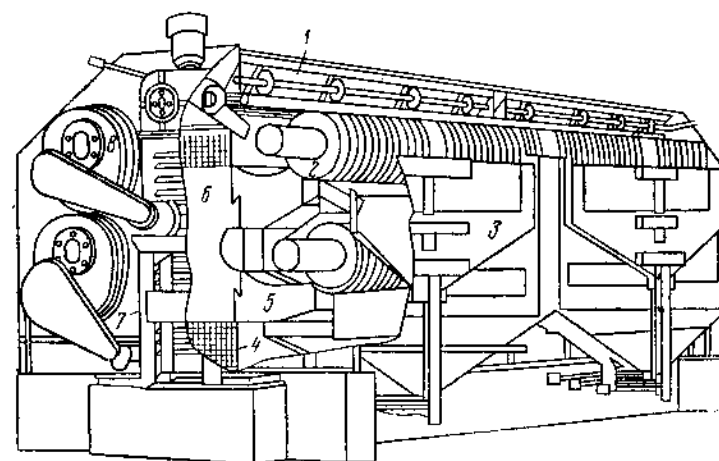


Рис. 23. Сепаратор 4ЭВМ-38/250

применением электромагнитной системы с тремя замкнутыми контурами магнитного потока, аналогичной системе сепаратора 2ЭВМ-38/250.

Сепаратор состоит из четырех валков 2, четырех сердечников 6 с катушками возбуждения 4, шестнадцати полюсных наконечников 5, двух питателей 1 с регулирующими шиберами, приемных ванн 3, привода 8 и рамы 7, на которой смонтированы все узлы сепаратора. Нижние валки, как и у сепаратора 4ЭВМ-30/100, осуществляют перемещение немагнитной фракции верхних валков. Электромагнитный сепаратор 4ЭВМ-380/250 является наиболее совершенным в области мокрого обогащения слабомагнитных руд, обеспечивая получение высоких технологических показателей при большой производительности.

Технологические показатели работы электромагнитных сепараторов при обогащении марганцевых руд Никопольского бассейна приведены в табл. 3 [6]. Техническая характеристика сепараторов для мокрого обогащения слабомагнитных руд приведена в приложении 5.

Таблица 3
Технологические показатели работы электромагнитных сепараторов при обогащении руд Никопольского марганцевого бассейна (по данным испытаний)

Марка сепаратора	Продукт, подлежащий обогащению	Питание			Магнитный продукт			
		Продолжительность, ч/д	Крупность, мм	Содержание железа, %	Выход, %	Содержание марганца, %	Извлечение марганца, %	Содержание марганца в немагнитном продукте, %
2ЭВМ-30/100	Просев грохота	4	-3+0	23,9	62,0	36,0	93,4	4,2
4ЭВМ-30/100	То же	6	-3+0	29,0	72,9	38,7	97,3	2,9
2ЭВМ-38/250	То же	14	-3+0	15,2	33,0	37,8	82,0	4,1

§ 11. Сепараторы для сухого обогащения слабомагнитных руд

Для сухого обогащения редкометалльных и других слабомагнитных руд применяются следующие типы сепараторов: 2ЭВС-36/100, 2ЭДС-60/40. Для удаления железистых примесей из стекольного, керамического и абразивного сырья применяются сепараторы: 6ЭВС-В-10/80, 2ЭВС-15/80, ЭВС-В-15/80 и некоторые другие. Валковые сепараторы для сухого обогащения выпускаются в двух исполнениях — с нижним и верхним питанием.

Сепаратор 2ЭВС-36/100 (233А-СЭ) разработан институтом «Механобрчермет» на базе сепаратора 2ВК-5В, который впервые был испытан при сухом обогащении на титан-циркониевых рудосыпях крупностью — 0,3 мм. Установлено, что важным резервом увеличения производительности валковых сепараторов при сухом обогащении является применение высокоскоростного режима разделения, достигаемого в результате увеличения линейной (окружной) скорости валков. Попытки увеличить частоту вращения валков серийного сепаратора 2ВК-5В оказались безуспешными, так как нагрев валков вихревыми токами достигал значительной величины и резко возрастала потребляемая мощность на их привод.

В связи с этим сепараторы 2ЭВС-36/100 были оборудованы комбинированными валками, состоящими из сплошного сердечника из литой динамной стали и наборной оболочки из листовой электротехнической стали. Другими конструктивными особенностями сепаратора 2ЭВС-36/100 по сравнению с сепаратором 2ВК-5В являются оборудование его навесными цилиндрическими редукторами вместо червячных и полная герметизация вани для создания санитарных условий труда.

На рис. 24 показана схема электромагнитного сепаратора 2ЭВС-36/100. Сепаратор состоит из двух валков 1, двух сердечников 2 с обмотками возбуждения, четырех полюсных наконечников 3, сборников 5, двух приводов 6 и питателя 7. Материал

поступает самотеком в рабочую зону сильного магнитного поля, образованную поверхностями валков и полюсных наконечников. Магнитные частицы выносятся вращающимися валками в зону ослабленного магнитного поля, где они отрываются, образуя широкий веер. Немагнитные частицы скользят по впадинам полюсных наконечников. Продукты обогащения поступают в сборники. Выход и качество продуктов регулируются при помощи отсекаелей 4.

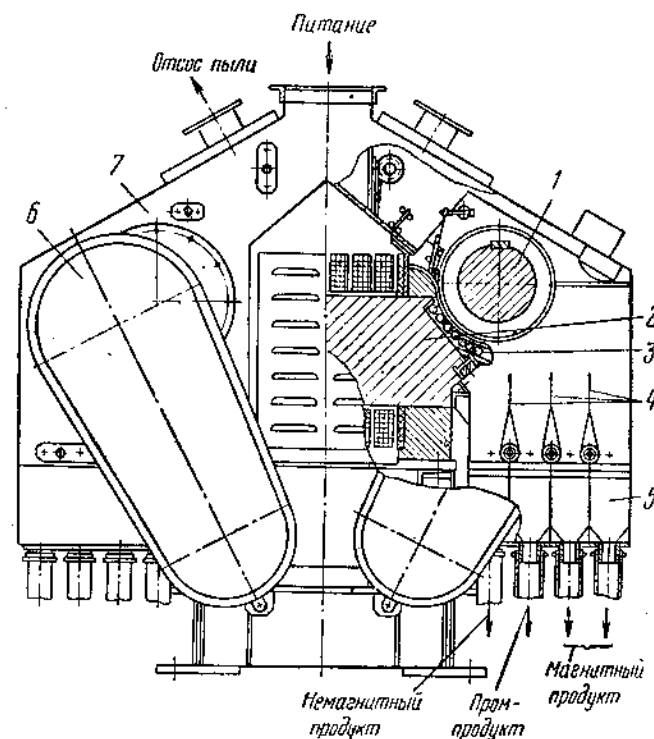


Рис. 24. Сепаратор 2ЭВС-36/100

Сепаратор может применяться для обогащения бурожелезных и нефелиновых руд на фабриках средней производительности.

Технологические показатели работы сепаратора 2ЭВС-36/100 при обогащении бурожелезнякавых оолитов Лисаковского месторождения крупностью — 2 +0 мм приведены в табл. 4 [6].

На рис. 25 показан сепаратор 4ЭВС-36/100 (ЭРС-6), который применяется для сухой сепарации редкометалльных и других слабомагнитных руд. Сепаратор состоит из четырех комбинированных валков 1, двух независимых электромагнитных систем (верхняя и нижняя), каждая из которых включает два

сердечника 4 с катушками возбуждения 3 и четыре полюсных наконечника 2. Катушки верхней и нижней электромагнитных систем соединяются таким образом, что протекающий по ним ток имеет одно направление.

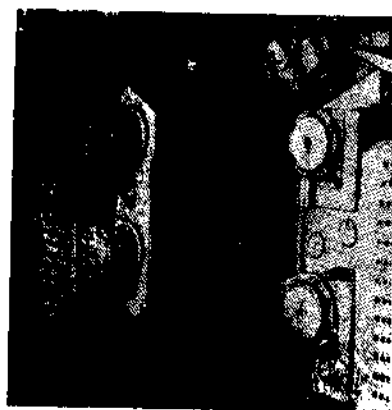


Рис. 25. Сепаратор 4ЭВС-36/100:
а — общий вид; б — схема устройства

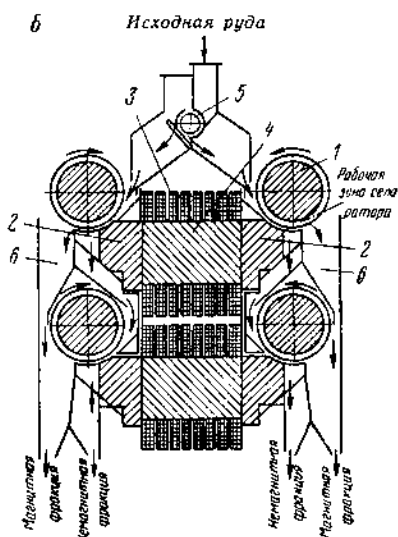


Таблица 4

Технологические показатели обогащения бурожелезняковых оолитов Лисаковского месторождения крупностью $-2+0$ мм на сепараторе 2ЭВС-36/100

Прием магнитного обогащения и продукт, подлежащий обогащению	Питание			Магнитный продукт			Промпродукт			Немагнитный продукт		
	Производительность, т/ч	Содержание железа — 0,15 мм, %	Содержание железа, %	Выход, %	Содержание железа, %	Извлечение железа, %	Выход, %	Содержание железа, %	Извлечение железа, %	Выход, %	Содержание железа, %	Извлечение железа, %
I прием Смешанная руда II сорта после сушки	10—12	6,6	36,4	57,9	48,7	77,4	23,7	28,0	18,4	18,4	8,3	4,2
II прием Перечистка промпродукта I приема	8—10	—	28,0	8,7	47,1	11,3	—	—	—	15,0	17,2	7,1
Исходный	—	6,6	36,1	66,6	48,5	88,7	—	—	—	33,4	12,3	11,3

Сердечники и полюсные наконечники сепаратора изготавливаются из малоуглеродистой динамной стали. Валки сепаратора состоят из сплошного сердечника диаметром 270 мм, изготавливаемого из литой динамной стали, и плотно насаженной на сердечник оболочки, выполненной из изолированных друг от друга тонких листов электротехнической стали. Сепаратор оборудован питателем 5 с шиберами для регулировки производительности и приемными двухсекционными ваннами 6 (для магнитной и немагнитной фракций). Ванна имеет уплотнения, обеспечивающие полную герметизацию сепаратора. Привод каждого валка индивидуальный и состоит из электродвигателя, клиноременной передачи и навесного цилиндрического редуктора, насаженного на цапфу валка.

Независимость электромагнитных систем верхних и нижних валков имеет важное технологическое преимущество, позволяя осуществлять раздельную регулировку напряженности магнитного поля на основной операции (два верхних валка) и на перечистке немагнитной фракции (два нижних валка) [7].

Исходный материал из питателя распределяется по лоткам в рабочие зоны верхнего каскада сепаратора. Магнитные частицы притягиваются к зубьям валков и выносятся в секции для магнитной фракции. Немагнитная фракция под действием собственного веса проходит через щели в полюсных наконечниках верхнего каскада и поступает на перечистную операцию, которая осуществляется в рабочих зонах нижнего каскада сепаратора. Магнитные фракции обоих каскадов сепаратора объединяются.

Электромагнитный сепаратор снабжается шкафом управления с пускорегулирующей аппаратурой, а также пультом управления, в котором располагается аппаратура сигнализации и автоматизации. Управление работой сепаратора может быть как местным, так и дистанционным.

Технологические показатели работы электромагнитного сепаратора 4ЭВС-36/100 при доводке концентратов россыпного месторождения приведены в табл. 5.

На рис. 26 показана принципиальная схема опытного образца электромагнитного сепаратора 8ЭВС-15/100, разработанного институтом «Гипромашобогашение» для сепарации редкометаллических и других слабомагнитных руд.

Сепаратор состоит из двух питателей 1, четырех рабочих блоков II и рамы 8 с приемными воронками 9. Каждый рабочий блок состоит из двух сердечников 3 с катушками 2, двух вращающихся роликов 4 и двух контрмагнитов 5. Для разделения вера продуктов сепарации служат отсекатели 10. Каждый ролик приводится во вращение индивидуальным приводом 13.

Дополнительные магнитопроводы (контрмагниты) переменного сечения устанавливаются с обратной стороны рабочего зазора с целью повышения напряженности магнитного поля и предотвращения прогиба роликов. Ролики диаметром 150 мм

Технологические показатели работы электромагнитного сепаратора

Продукт, поступающий на сепарацию	Производительность, т/ч	Продукт сепарации	Выход, %	Содержа	
				Фракция	
				магнитная	немагнитная
Проводниковая фракция коллективного концентрата	6,0	Магнитный	67,1	99,0	1,0
		Немагнитный	32,9	2,0	98,0
		Исходный	100,0	67,2	32,8

Примечание. В таблице указано содержание основных минералов, остальные

изготавливаются из сплошных сердечников (динамная сталь), на которые напрессовывается оболочка из изолированных тонких листов электротехнической стали.

Для обеспечения различных технологических схем служат тетки 12 и 6. Тетки 7 служат для подачи материала из питателя в рабочие блоки. Число рабочих блоков зависит от необходимой производительности или выбранной технологической схемы сепарации.

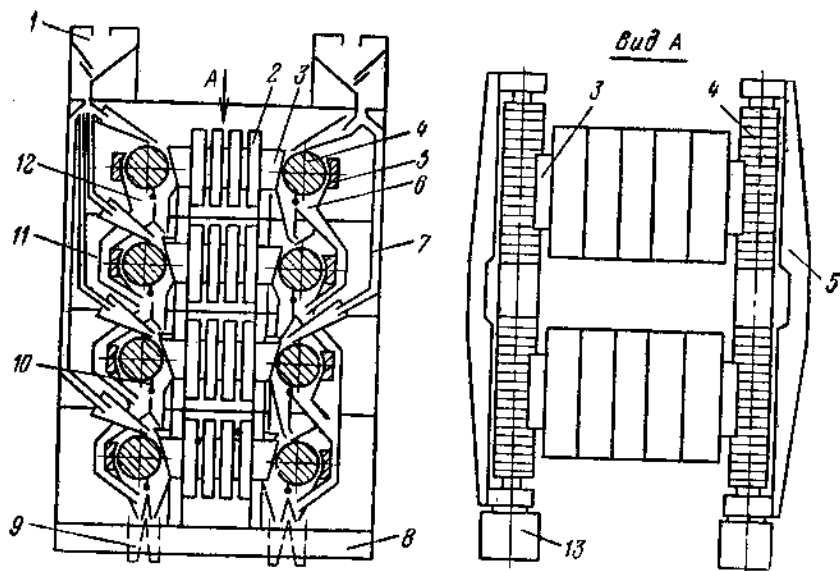


Рис. 26. Принципиальная схема сепаратора 8ЭВС-15/100

Работа сепаратора осуществляется следующим образом: из питателя материал поступает по тетке 7 в рабочий блок и далее в зазор между полюсным наконечником и вращающимся роликом. После разделения магнитная и немагнитная фракции либо

49ВС-36/100 при доводке редкометалльных концентратов

Таблица 5

Минерал				Извлечение, %			
Фракция				Минерал			
циркон		рутил		ильменит		ставролит	
магнитная	немагнитная	магнитная	немагнитная	циркон	рутил	ильменит	ставролит
—	1,8	91,2	1,2	98,8	1,8	—	4,5
9,3	77,1	2,6	0,3	1,2	98,2	100	95,5
3,0	26,6	62,0	0,9	100,0	100,0	100,0	100,0

представлены дистеном, турмалином, хромитом и др.

выводятся из сепаратора при параллельной работе всех секций (на рис. 26 — левый ряд роликов), либо один из продуктов поступает на пересистку (на рис. 26 — правый ряд валков).

Для доводки концентратов руд редких металлов, вольфрама и некоторых других материалов находят еще применение дисковые сепараторы, обеспечивающие получение хороших технологических показателей, хотя производительность их весьма низкая и практически не превышает 250 кг/ч.

На рис. 27 показано принципиальное устройство дискового сепаратора 2ЭДС-60/40 (МС-2). Сепаратор состоит из двух дисков 1 диаметром 600 мм, магнитопровода 2 с катушками возбуждения 3 и 4, питателя 7, привода питателя 5, вибрационного лотка шириной 400 мм с тягами 8, двух приводов 9 дисков, регулировочных винтов 10, рамы 6. Диски сепаратора изготавливаются из малоуглеродистой стали, а вибрационный лоток — из немагнитных материалов.

Исходное питание при помощи барабанного питателя равномерно распределяется по лотку и за счет его вибрации транспортируется под вращающиеся диски. Магнитные частицы притягиваются к заостренным краям дисков и выносятся в концентратный бункер, а немагнитные, пройдя вдоль лотка, разгружаются в хвостовой бункер. В результате многократных пересисток немагнитной фракции достигается высокое извлечение магнитных минералов в концентрат.

Регулировка рабочего зазора между дисками и полюсными наконечниками осуществляется при помощи регулировочных винтов 10.

Техническая характеристика электромагнитных сепараторов для сухого обогащения слабомагнитных руд приведена в приложении 6.

§ 12. Вспомогательные магнитные аппараты, применяемые на обогатительных фабриках

При обогащении тонковкрапленных сильномагнитных руд широко применяются вспомогательные магнитные аппараты,

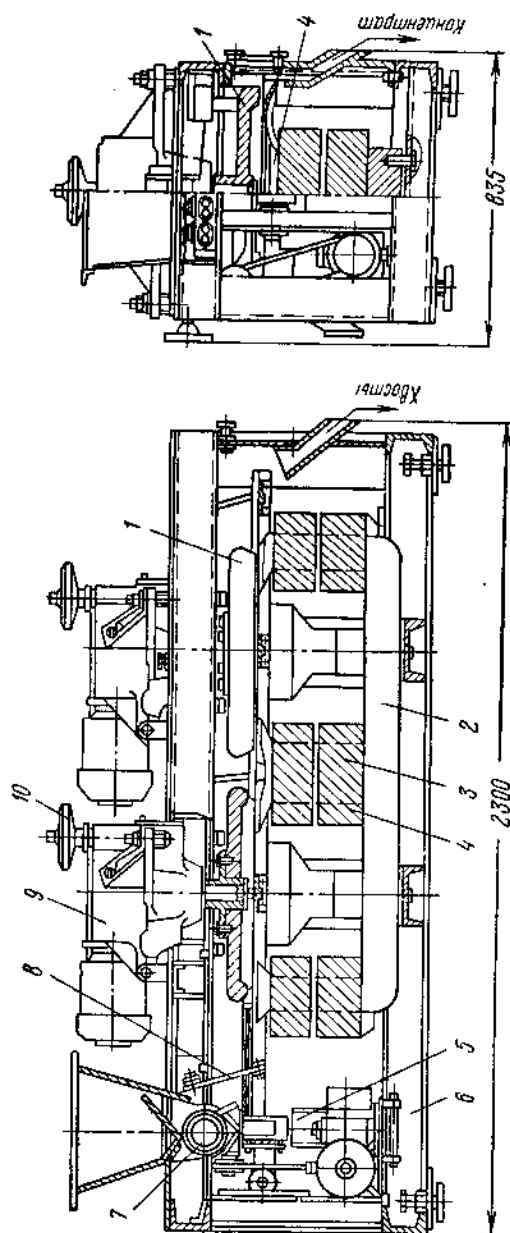


Рис. 27. Сепаратор 23ДС-60/40

в которых осуществляется намагничивание пульпы перед операциями обесшламливания и сгущения или размагничивание материала перед его классификацией. Намагничивание и размагничивание пульпы могут также применяться для повышения эффективности процесса магнитной сепарации.

Намагничивающие аппараты предназначены для магнитной флокуляции сильномагнитных частиц с целью их более быстрого осаждения по сравнению с немагнитными частицами, а размагничивающие — для дефлокуляции (разрушение флокул) сильномагнитных частиц, так как наличие магнитных флокул нарушает процесс классификации. Для намагничивания применяют различные типы намагничивающих аппаратов. Как правило, такой аппарат имеет рабочий орган в виде трубы 1 из немагнитного материала, на которую устанавливают катушки, питаемые постоянным электрическим током, или постоянные магниты 2 (рис. 28). У намагничивающего аппарата, показанного на рис. 28, установлены постоянные магниты, выполненные в виде стержней трапецеидального сечения, которые закрепляются в специальных магнитных держателях по наружному диаметру трубы.

Размагничивание сильномагнитной пульпы происходит при многократном циклическом перемагничивании ее в переменном магнитном поле. Амплитуда напряженности этого поля убывает в направлении перемещения пульпы от некоторого максимального значения до нуля. Обмотка возбуждения размагничивающих аппаратов питается переменным током промышленной частоты (50 Гц).

На рис. 29 показана схема размагничивающего аппарата, включающего трубу 1 из немагнитного материала, на которую надеты катушки 2. Катушки помещены в кожух 3, заполненный трансформаторным маслом. Число витков в катушках уменьшается по ходу движения размагничиваемой пульпы. Поток пульпы пропускается через трубу и взвешенные в ней частицы многократно перемагничиваются. Так как по направлению потока число витков в катушках уменьшается, то и напряженность магнитного поля, пропорциональная числу ампер-витков, снижается. Поэтому намагниченность частиц по мере прохождения их по трубе падает по типу затухающих колебаний.

Для обесшламливания и сгущения тонкоизмельченного сильномагнитного материала перед магнитным обогащением или фильтрованием применяются магнитные дешламаторы.

На рис. 30 показан магнитный дешламатор МД-50. Дешламатор представляет собой емкость, подобную сгустителю с центральным приводом гребков, и состоит из чаши 1, гребков 2, магнитного устройства 3, приемного бака 5, распределительного бака 4, разгрузочного отверстия 6. Гребки насажены на вал, который приводится во вращение от электродвигателя 7. Положение гребков регулируется винтом 8.

Пульпа поступает в приемный бак, из которого по открытому желобу направляется в бак-распределитель. В днище бака-распределителя вмонтированы четыре намагничивающих аппарата на постоянных магнитах конструкции института «Механобрчермет». Проходя через намагничивающее устройство, пульпа намагничивается с образованием агрегатов (флокул) из сильномагнитных частиц. Последние оседают на дно чаши и при помощи гребков перемещаются к разгрузочному отверстию.

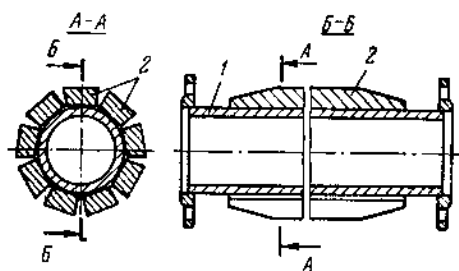
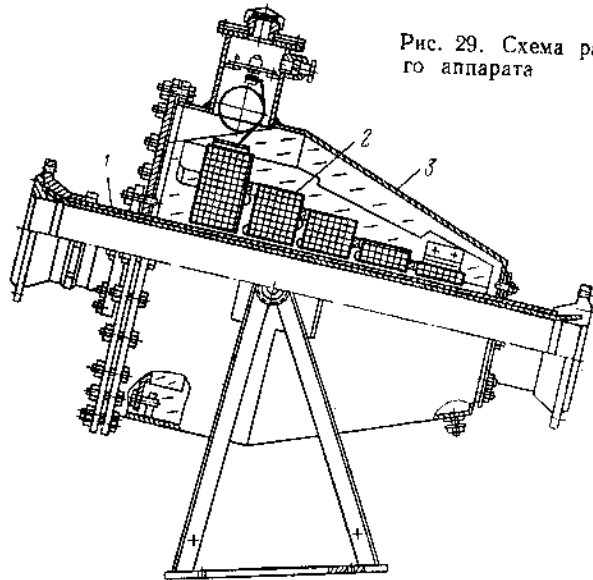


Рис. 28. Схема намагничивающего аппарата

Рис. 29. Схема размагничивающего аппарата



Шламистые частицы увлекаются восходящими потоками воды и разгружаются через порог в кольцевой желоб.

Техническая характеристика магнитного дешламатора МД-50

Крупность исходного питания, мм	0,1—0
Производительность, т/ч	40—65
Напряженность магнитного поля в рабочем зазоре намагничивающего устройства, Э	400—500

Установочная мощность привода, кВт	2,8
Плотность слива, % твердого	50
Площадь сливного зеркала, м ²	14,6
Габаритные размеры, мм:	
длина	5400
ширина	4700
высота	5300
Масса, т	10

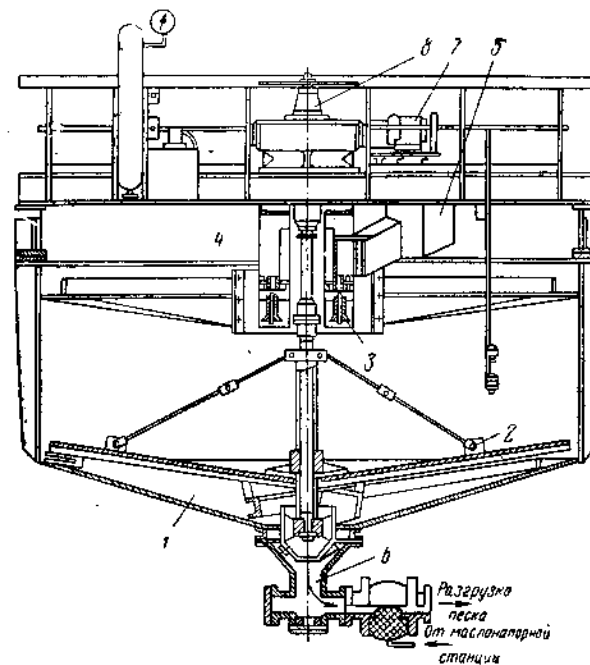


Рис. 30. Дешламатор МД-50

Глава III

Новые методы магнитного обогащения

§ 13. Магнитогидродинамическая и магнитогидростатическая сепарация

Магнитогидродинамическая и магнитогидростатическая сепарация полезных ископаемых основана на взаимодействии электромагнитных полей с жидкостями, обладающими электропроводностью и магнитной восприимчивостью.

В результате такого взаимодействия жидкие электролиты и растворы магнитных солей искусственно утяжеляются и при

погружении в них минеральной смеси происходит разделение частиц по плотности, аналогично тяжелосредному обогащению. Но по своей сущности эти методы сепарации являются комбинированными электромагнитно-гравитационными процессами, т. е. процессами, при которых сепарация происходит в зависимости от разницы в плотности, электропроводности, магнитной восприимчивости и диэлектрической проницаемости частиц.

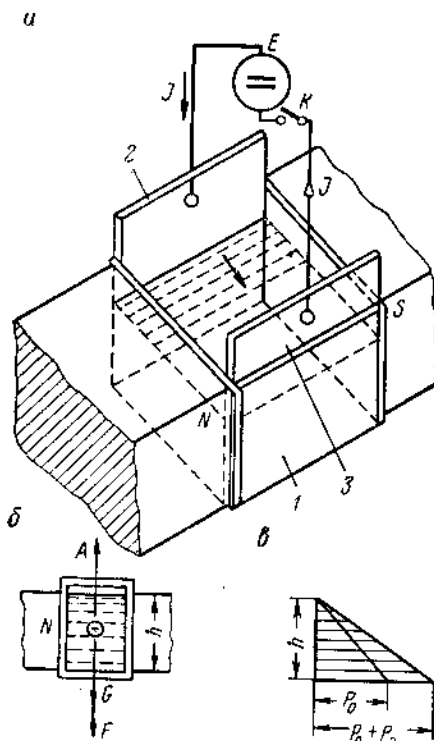


Рис. 31. Магнитогиродинамическое устройство:

а — схема устройства; б — схема сил, действующих на частицу минерала; в — диаграмма суммарных сил

ских электродов 2 и 3, подключенных к клеммам источника электрического тока. При замыкании цепи ключом через токопроводящую жидкость (электролит) будет проходить электрический ток, сила взаимодействия которого с магнитным полем определяется по формуле

$$F = BI,$$

где B — индукция магнитного поля в межполюсном зазоре;

I — ток, проходящий через жидкость;

l — расстояние между электродами.

Магнитогиродинамическая сепарация материала (МГД-сепарация) осуществляется в жидком электролите, помещенном в скрещенные электрическое и магнитное поля.

Магнитогидростатическая сепарация (МГС-сепарация) отличается от МГД-сепарации тем, что тяжелая среда для разделения частиц создается в результате воздействия неоднородного магнитного поля на растворы магнитных солей.

Рассмотрим механизм разделения частиц при МГД-сепарации на примере простейшего магнитогиродинамического устройства, показанного на рис. 31 [8]. Устройство состоит из электромагнита с полюсами N и S , кюветы l из диэлектрического материала, металлических электродов 2 и 3, погруженных в жидкий электролит.

При замыкании цепи ключом через токопроводящую жидкость (электролит) будет проходить электрический ток, сила взаимодействия которого с магнитным полем определяется по формуле

Через элементарное сечение ds жидкости протекает ток

$$dI = jds,$$

где j — плотность электрического тока в электролите.

В этом сечении на элементарный объем жидкости действует электромагнитная сила

$$dF = Bjlds,$$

где $lds = dv$ — элементарный объем жидкости.

Отсюда находим:

$$Bj = \frac{dF}{dv}.$$

В этом же сечении действует сила тяжести жидкости, направленная вниз. Таким образом, для одинаково направленных вниз электромагнитной силы и силы тяжести, как это показано на рис. 31, в, на нижние слои жидкости будет действовать давление p_0 , определяемое силой тяжести G , и дополнительное давление p_s , возникающее за счет электромагнитной силы F . Вышеизложенное находит выражение в следующих формулах:

$$\gamma_0 = \frac{p_0}{h} \text{ и } p = Bj = \frac{p_s}{h},$$

где γ_0 — удельный вес жидкости;

p — прирост удельного веса жидкости за счет действия электромагнитной силы.

Общая величина удельного веса жидкости δ_0 будет равна $\delta_0 = \gamma_0 + p$ или $\delta_0 = \gamma_0 + Bj$. Таким образом, при сложении объемной электромагнитной силы Bj с удельным весом жидкости γ_0 общая величина удельного веса жидкости возрастает.

Направление электромагнитной силы F зависит от направления электрического тока в жидкости. Если изменить направление тока на обратное (по сравнению с рис. 31), то электромагнитная сила F будет действовать вверх и общая величина удельного веса будет равна:

$$\delta_0 = \gamma_0 - Bj.$$

Отсюда видно, что регулируя величины тока или индукции магнитного поля, можно управлять удельным весом жидкости, в том числе и создать условия, когда $\gamma_0 = Bj$ и $\delta_0 = 0$, т. е. жидкость станет «невесомой». В этом заключается весьма важное преимущество метода магнитогиродинамической сепарации по сравнению с обогащением в тяжелых средах.

Если при отключенных от источника тока обмотках электромагнита поместить в кювету две частицы равного объема V — легкую (удельный вес γ_n) и тяжелую (удельный вес γ_r), то на них будут действовать силы, направленные вниз: на легкую частицу — $G_n = \gamma_n V$, на тяжелую — $G_r = \gamma_r V$. Одновременно на частицы действует архимедова сила, направленная вверх и равная $A = \gamma_0 V$.

Результирующие силы, действующие на частицы, будут равны

$$A_{\text{л}} = G_{\text{л}} - A \quad \text{и} \quad A_{\text{т}} = G_{\text{т}} - A.$$

Если $A_{\text{л}} < A < A_{\text{т}}$, то легкая частица всплывает, а тяжелая оседает на дно ванны.

Если же $A < A_{\text{л}}$ и $A < A_{\text{т}}$ — утонут обе частицы.

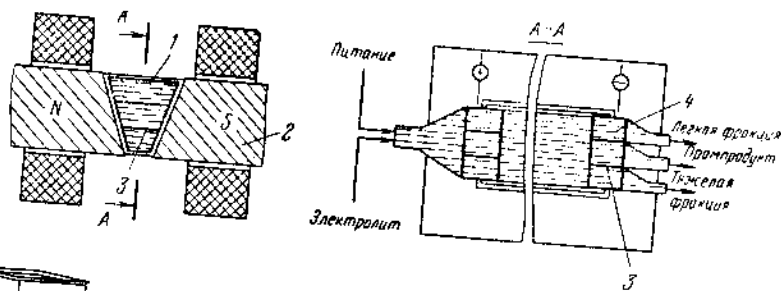


Рис. 32. Принципиальная схема магнитогиродинамического сепаратора

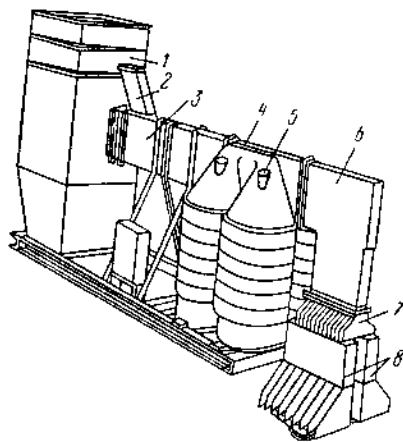


Рис. 33. Магнитогиродинамический сепаратор МГДС-50

При подключении к источнику тока обмоток электромагнита и электродов архимедова сила будет равна

$$A = (\gamma_0 + Bf) V.$$

Разделение частиц произойдет в том случае, если $A_{\text{л}} > (\gamma_0 + Bf) V$ и $A_{\text{т}} < A_{\text{л}}$.

На рис. 32 показана схема магнитогиродинамического сепаратора. Сепаратор представляет собой ванну 1, расположенную между полюсами 2 электромагнита. В ванне смонтированы трубчатые электроды 4, подключаемые к источнику постоянного тока. Межполюсный зазор магнитной системы имеет переменное сечение по вертикали, в результате чего создается градиент напряженности магнитного поля и, как следствие, градиент плотности электропроводной жидкости по высоте ванны. Величина

плотности имеет максимальное значение в нижней зоне ванны сепаратора и уменьшается в направлении снизу вверх.

Исходный материал с электропроводной жидкостью поступает в ванну сепаратора, где происходит разделение его на фракции по плотности: тяжелые частицы оседают на дно ванны, легкие — всплывают, а промежуточные — остаются в слое соответствующей плотности. Для разделения продуктов обогащения служат перегородки 3. Продукты обогащения выгружаются из сепаратора потоком жидкости и собираются в отдельные приемники.

На рис. 33 показан магнитогиродинамический сепаратор МГДС-50 для обогащения углей класса 0,5—13 мм.

Сепаратор состоит из гидростабилизатора 1, точки 2 для подачи исходного материала, загрузочной секции 3, рабочей секции канала 4, выходной секции канала 6, распределителя 7, приемного устройства 8. Рабочая секция канала помещена между полюсами электромагнита 5.

Электропроводная жидкость (электролит) вместе с исходным материалом поступает в загрузочную секцию и проходит по рабочему каналу через межполюсный зазор электромагнита, где происходит расслоение материала по плотности. Выходная секция канала оборудована внутри съемным комплектом горизонтальных перегородок, что в сочетании с распределителем 7 позволяет получать на выходе из сепаратора несколько продуктов обогащения. Сепаратор имеет замкнутую систему циркуляции рабочей жидкости. На выходе из рабочего канала электролит фильтруется на дуговых ситах и осветляется. Осветленный электролит поступает в гидростабилизатор для повторного использования в процессе. В качестве рабочей жидкости применяется водный раствор поваренной соли 5—7%-ной концентрации.

Секции рабочего канала изготовлены из диэлектрических материалов. Их детали скреплены между собой шпильками, а герметичность обеспечена уплотняющими прокладками из мягкой резины. Питание электромагнита и рабочего канала осуществляется от преобразователей постоянного тока, включенных в электрическую сеть напряжением 380 В. В рабочую секцию канала ток подается импульсами в определенной последовательности, что дает возможность при той же эффективности обогащения снизить затрачиваемую мощность. Производительность сепаратора по исходному материалу до 50 т/ч. Потребляемая мощность, кВт: электромагнита — 42, рабочего канала — 105. Габаритные размеры, м: длина 7,71, ширина 1,80, высота 5,20. Масса 41,5 т.

Принципиальное различие процессов МГС- и МГД-сепарации заключается в том, что в первом случае дополнительная выталкивающая сила имеет чисто магнитное происхождение, т. е. утяжеление магнитной жидкости вызывается воздействием на нее только неоднородного магнитного поля (без наложения электри-

ческого поля). В качестве магнитных жидкостей применяются водные растворы хлористого железа и хлористого марганца, бромистого марганца и железа, а также суспензии с тонкоизмельченными ферромагнитными частицами. Неоднородные магнитные поля получают за счет подбора соответствующей геометрии межполюсного зазора электромагнита.

Наиболее часто применяются полюсные наконечники клиновидной формы (см. рис. 32). Представляет интерес также создание в рабочем зазоре электромагнита неоднородного магнитного поля с градиентом напряженности, направленным под углом к направлению силы тяжести или горизонтально.

Если поместить частицу в магнитную жидкость, находящуюся в неоднородном магнитном поле, то на нее будет действовать объемная сила, определяемая уравнением

$$f = (\delta_{\text{ч}} - \delta_{\text{ж}})g + k(x_{\text{ч}} - x_{\text{ж}})H \text{ grad } H,$$

где f — объемная сила, действующая на частицу;
 $\delta_{\text{ч}}$ и $x_{\text{ч}}$ — плотность и объемная магнитная восприимчивость частицы;

$\delta_{\text{ж}}$ и $x_{\text{ж}}$ — плотность и объемная магнитная восприимчивость магнитной жидкости;

k — коэффициент, зависящий от формы частицы;

$H \text{ grad } H$ — напряженность и неоднородность магнитного поля в зоне расположения частицы.

Из уравнения следует, что при магнитогидростатической сепарации происходит разделение частиц по плотности и магнитной восприимчивости. На частицы, имеющие относительно меньшие плотность и магнитную восприимчивость, действует большая выталкивающая сила и они всплывают в верхние слои жидкости, и наоборот, частицы с более высокими значениями плотности и магнитной восприимчивости попадают в нижние слои жидкости.

Утяжеление рабочей жидкости при магнитогидростатической сепарации происходит в результате дополнительного давления, оказываемого магнитными компонентами жидкости при их движении (втягивании) в зону наибольшей напряженности магнитного поля. Плотность рабочей жидкости при МГС-сепарации может быть увеличена до 10 г/см³.

Область промышленного применения процессов МГД- и МГС-сепарации в настоящее время весьма ограничена. Связано это прежде всего с отсутствием экономичных электромагнитных систем с высоким уровнем индукции (7—10 Т), а также с трудностями при выборе токопроводящих и магнитных жидкостей. Первое затруднение может быть устранено применением магнитных систем на сверхпроводниках, разработка которых интенсивно ведется в СССР и за рубежом. Экономическими соображениями определяется также и выбор типа рабочей жидкости. Наиболее перспективно применение МГД-сепарации в тех случаях, когда

компоненты обогащаемого сырья образуют естественный электролит (например, при обогащении селвинита и галита). Применение МГС-сепарации для обогащения железных и марганцевых руд может быть экономически оправдано при организации производства на их основе соответствующих магнитных жидкостей.

§ 14. Полиградиентная магнитная сепарация

При магнитном обогащении слабомагнитных руд трудность представляет разделение тонкоизмельченных материалов. Мокрое обогащение тонкоизмельченных слабомагнитных материалов на валковых электромагнитных сепараторах недостаточно эффективно, что объясняется большим гидравлическим сопротивлением движению тонких частиц, в результате чего они не успевают за время прохождения через рабочую зону сепаратора преодолеть относительно большое расстояние в направлении к зубьям вала.

В 1939 г. В. Г. Деркач и И. С. Дацюк предложили использовать для обогащения тонкоизмельченных слабомагнитных материалов сепараторы специальной конструкции, которые называются полиградиентными сепараторами. Эти сепараторы отличаются от обычных барабанных магнитных сепараторов наличием в их рабочем пространстве мелких магнитов-носителей (полиградиентная среда), в зазорах между которыми индуцируются сильные магнитные поля. В качестве полиградиентной среды используются мелкие шары, буровая дробь ($d=6-8$ мм) и другие мелкие железные материалы, которые для снижения коэрцитивной силы предварительно обжигают при температуре 600°С без доступа кислорода, а затем медленно охлаждают.

Особенностью полиградиентных сред является тот факт, что благодаря малым размерам соседние шары соприкасаются в точке. Поэтому даже при небольшой напряженности поля в рабочем пространстве в этих точках наступает магнитное насыщение, а прилегающие области характеризуются очень высоким объемным градиентом и, следовательно, большой силой поля. В областях с большой силой магнитного поля происходит интенсивное притяжение и удерживание тонкоизмельченных слабомагнитных частиц, в то время как немагнитные частицы фильтруются через отверстия между шарами.

Устройство и принцип работы полиградиентных сепараторов рассмотрим на примере конструкции 230-СЭ, показанной на рис. 34. Сепаратор состоит из барабана 5, внутри которого неподвижно закреплена пятиполюсная магнитная система 4. Рабочее пространство сепаратора заполнено стальными шариками 3. Между ванной 10 и барабаном расположено дугообразное сито 7, которое в средней части под барабаном перекрывается порогом 8. Сепаратор оборудован питателем 1, прижимными

валиками 11, брызгалами 2 и 6. Все узлы сепаратора крепятся на раме 9 [17].

Исходный материал из питателя в виде пульпы подается на слой шаров, который удерживается на барабане полем магнитной системы. Немагнитные частицы профильтровываются через слой шаров и поступают в хвостовое отделение ванны. Магнитные частицы, удерживаемые магнитной силой в каналах между шарами, поднимаются вместе с ними в верхнюю часть

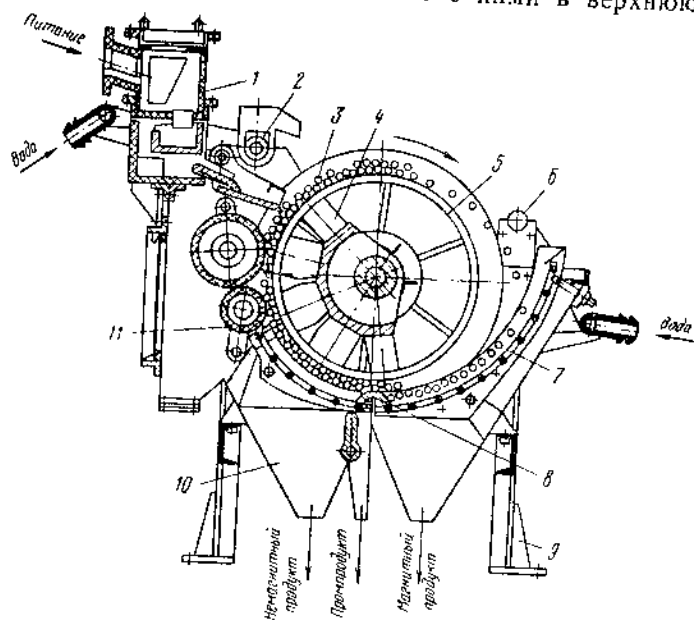


Рис. 34. Полиградиентный сепаратор 230-СЭ

барабана, где производится окончательная отмывка немагнитных частиц водой из брызгала 2. Шары вместе с магнитными частицами транспортируются барабаном и попадают на сито, где осуществляется отмывка магнитных частиц водой из брызгала 6. Магнитные частицы попадают в концентратное и частично в промпродуктовое отделения ванны, а шары, пройдя через порог, снова поступают в зону действия магнитного поля. Далее цикл повторяется.

Основные параметры сепаратора 230-СЭ следующие: диаметр барабана 600 мм, длина барабана 2480 мм, масса загрузаемых шаров 400 кг, масса сепаратора 4 т, частота вращения барабана 6—10 об/мин. При крупности обогащаемого материала менее 0,5 мм производительность сепаратора составляет 15—25 т/ч.

Технологические показатели работы сепаратора при обогащении титаномагнетитовых руд приведены в табл. 6.

Таблица 6
Технологические показатели обогащения титаномагнетитовой руды на сепараторе 230-СЭ

производительность, т/ч	Питание					Магнитный продукт, %					Немагнитный продукт, %	
	содержание железа, %	содержание титана, %	содержание двуокиси титана, %	содержание железа, %	содержание титана, %	выход	содержание двуокиси титана	содержание железа	содержание двуокиси титана	содержание железа	содержание двуокиси титана	содержание железа
23	41,0	32,0	6,7	15,8	13,2	18,5	34,2	36,5	28,6	4,9	13,0	

Сложность процесса полиградиентной сепарации заключается в том, что имеющиеся в исходном питании даже незначительные примеси ферромагнитных материалов быстро забивают межшаровое пространство вблизи точек контакта шаров и эффективность процесса сепарации снижается. Регенерация шаров (удаление с них притянутых ферромагнитных частиц) до сих пор вызывает большие затруднения, что в значительной мере сдерживает применение полиградиентных сепараторов для обогащения тонкоизмельченных слабомагнитных материалов. Однако имеющийся промышленный опыт применения полиградиентных сепараторов показывает, что в будущем они могут получить широкое промышленное внедрение.

§ 15. Термомагнитная сепарация руд

Особенностью парамагнитных и ферромагнитных минералов является зависимость их магнитной восприимчивости от температуры. Эту особенность используют для управления магнитными свойствами минералов, создавая более благоприятные условия для их разделения в магнитном поле. Магнитная сепарация минералов с предварительным их подогревом до определенной температуры получила название термомагнитной сепарации.

Установлено, что для большинства ферромагнетиков и парамагнетиков существует значение температуры, при котором они становятся практически немагнитными. Это значение температуры носит название точки Кюри и различно для разных минералов. Например, для магнетита она равна 578° С, ильменита — 153° С.

Ведя процесс магнитной сепарации при температуре, промежуточной между точками Кюри двух минералов, можно получить высокую четкость их разделения.

Терромагнитная сепарация испытывалась на одной из фабрик, обогащающей титано-циркониевые руды россыпного месторождения.

Сепарации подвергался гравитационный коллективный концентрат, в котором основное количество ценных минералов концентрируется в классе $-0,16+0,063$ мм (92—95%). Результаты магнитной сепарации коллективного концентрата при различных температурах (табл. 7) подтверждают различное воздействие температуры на магнитные свойства минералов. С повышением температуры сепарируемой смеси при постоянной напряженности магнитного поля извлечение ильменита и ставролита в магнитную фракцию уменьшается, в то время как извлечение хромита остается неизменным; содержание хромита в магнитной фракции увеличивается.

Двукратная пересортировка немагнитной фракции, подогретой до 300°C , позволила извлечь в магнитную фракцию до 90% хромшпинелидов и лишь 5—7% ильменита и 2—3% ставролита.

Таким образом, применяя предварительный нагрев редкометальных руд, можно разделить такие близкие по своим магнитным свойствам минералы, как ильменит и хромит, в обычных условиях не разделяемые магнитными методами. Магнитная сепарация подогретого до $300-320^{\circ}\text{C}$ ильменитового концентрата, содержащего 4—6% хромита, с тремя пересортировками немагнитной фракции позволила снизить содержание в ней хромита до 0,2—0,3%.

Глава IV

Подготовка и ведение процесса магнитной сепарации

§ 16. Факторы, влияющие на процесс магнитного обогащения

Напряженность магнитного поля. На процесс магнитной сепарации влияет напряженность магнитного поля. Магнитная сила возникает только в неоднородных магнитных полях и в каждой точке поля равна произведению магнитной восприимчивости минерала, напряженности магнитного поля в данной точке и степени неоднородности поля. Из-за сложности непосредственного измерения магнитной силы, о ее величине косвенно судят по напряженности магнитного поля в определенной точке, считая, что степень неоднородности поля выбрана оптимальной в процессе конструирования сепаратора.

Увеличение напряженности поля приводит к увеличению магнитной силы и, как следствие, позволяет извлекать в магнитную фракцию минералы с более низкой магнитной воспри-

Таблица 7
Результаты магнитной сепарации гравитационного коллективно-о концентрата при различных температурах

Температура	Продукт	Выход, %	Содержание, %						Извлечение, %					
			циркон	рутила	ильменит	ставролит	хромит	прочих	циркон	рутила	ильменит	ставролит	хромит	прочих
30	Магнитная фракция	5,3	0,40	2,26	76,15	8,10	5,7	7,39	0,2	0,9	9,8	3,2	42,9	2,2
	Немагнитная фракция	94,7	14,20	13,97	39,00	13,35	0,42	19,06	99,8	99,1	90,2	96,8	57,1	97,8
	Исходный	100,0	13,47	13,34	41,04	13,08	0,70	18,37	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
170	Магнитная фракция	3,6	0,55	2,47	69,23	9,33	7,41	11,01	0,1	0,7	5,6	3,0	43,1	2,5
	Немагнитная фракция	96,4	14,90	13,10	43,90	11,30	0,36	16,44	99,9	99,3	94,4	97,0	56,9	97,5
	Исходный	100,0	14,35	12,70	44,75	11,20	0,62	16,38	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
280	Магнитная фракция	2,1	2,2	6,84	53,50	8,25	11,20	18,01	0,3	0,9	2,8	1,3	41,5	2,0
	Немагнитная фракция	97,9	15,75	16,40	39,90	14,81	0,34	12,80	99,7	99,1	97,2	98,7	58,5	98,0
	Исходный	100,0	15,43	16,20	40,13	14,67	0,57	12,98	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

имчивостью. Это оказывает влияние на выход и качество продуктов разделения. Обычно оптимальное значение напряженности поля в рабочем зазоре сепаратора для данного сырья устанавливается опытным путем и в процессе сепарации регулируется лишь в незначительных пределах. Следует иметь в виду, что чрезмерное увеличение напряженности поля может привести к повышенному засорению магнитной фракции и, наоборот, недостаточная величина напряженности поля является причиной потерь магнитных минералов с хвостами.

Характеристика магнитного поля у серийно выпускаемых магнитных сепараторов определяется при заводских испытаниях. У сепараторов с электромагнитными системами устанавливается зависимость между напряженностью поля в рабочем пространстве и значением намагничивающего тока. По последнему параметру судят о величине напряженности поля. Однако соответствие значений этих двух величин необходимо периодически контролировать непосредственным измерением напряженности поля.

Если технологическая схема обогащения включает несколько последовательных операций магнитной сепарации, то при перемещении немагнитной фракции напряженность магнитного поля в каждой последующей операции должна быть увеличена. Доводка же магнитных концентратов осуществляется при постепенном уменьшении напряженности поля.

Параметры рабочей зоны. Параметры рабочей зоны (длина и высота), а также ширина питания определяют пропускную способность, т. е. производительность сепаратора. Длина рабочей зоны и ширина питания рассчитываются при разработке конструкции сепаратора и, как правило, в процессе его эксплуатации не изменяются. С увеличением диаметра барабана (валка) длина рабочей зоны возрастает, а это позволяет повысить извлечение магнитных минералов и производительность сепаратора. Повышение производительности достигается также при увеличении ширины питания (длины барабана, валка). Однако чрезмерное увеличение размеров барабана (валка) приводит к значительному возрастанию массы магнитных систем, а следовательно, габаритных размеров и массы сепаратора. Поэтому для каждого типа сепаратора определяются оптимальные размеры его рабочего органа технико-экономическими расчетами.

Высота рабочей зоны определяется в процессе создания конструкции сепаратора, но в отличие от описанных параметров может в определенных пределах изменяться при технологической наладке сепаратора для обогащения данного вида минерального сырья.

Уменьшение высоты рабочей зоны приводит к увеличению напряженности магнитного поля и наоборот. Однако практика эксплуатации магнитных сепараторов показывает, что во многих случаях технологический эффект от изменения напряженности

в результате регулировки намагничивающего тока и высоты рабочей зоны может быть различным. Поэтому в процессе наладки сепаратора необходимо установить такую высоту рабочей зоны, которая без ущерба для производительности обеспечит бы наиболее высокое качество продуктов обогащения.

Скорость вращения барабанов и валков. Скорость вращения рабочего органа сепаратора в значительной мере определяет его производительность и качество продуктов обогащения. Выбирается скорость вращения барабанов и валков в зависимости от метода обогащения (сухой или мокрый), способа подачи питания (верхний или нижний), магнитной восприимчивости и крупности разделяемых минералов, необходимого качества продуктов обогащения (получение готовых концентратов или отвальных хвостов).

При мокром обогащении чрезмерно большая линейная (окружная) скорость вращения барабана и валка может привести к отрыву пульпы от их поверхности и нарушить процесс разделения. Поэтому при обогащении сильномагнитных руд эта скорость не должна превышать 1,5 м/с, а при обогащении слабомагнитных руд — 0,8—0,9 м/с. При выделении отвальных хвостов скорость вращения барабанов и валков должна быть ниже, чем при выделении концентратов. Сухая магнитная сепарация крупнокусковой сильномагнитной руды допускает увеличение линейной (окружной) скорости вращения барабана до 2 м/с. Большое влияние на технологические показатели оказывает скорость вращения барабана при сухом обогащении тонкоизмельченной сильномагнитной руды. В этом случае высокие технологические показатели обогащения удается получить только при быстрходном режиме сепарации. Поэтому у серийно выпускаемых магнитных сепараторов для сухого обогащения тонкоизмельченных сильномагнитных руд предусматривается широкий диапазон изменения скорости вращения барабана (1,5—10 м/с) в зависимости от магнитных свойств и крупности обогащаемой руды.

При сухой сепарации слабомагнитных руд также предпочтение отдается быстрходному режиму, так как увеличение скорости вращения валков у сепараторов как с верхней, так и с нижней подачей питания улучшает качество магнитного продукта и повышает производительность сепаратора. Скорость вращения валков у этих сепараторов обычно регулируется в пределах 0,8—2,4 м/с. При одном и том же значении силы магнитного поля сепаратора большую скорость вращения валка можно допустить при более высокой удельной магнитной восприимчивости извлекаемого минерала.

Крупность и магнитные свойства обогащаемой руды. Допустимые пределы крупности обогащаемой руды включаются в техническую характеристику сепараторов в качестве одного из важнейших параметров, определяющих технологические

показатели его работы. От крупности частиц зависят магнитные свойства сепарируемого материала. Установлено, что с уменьшением крупности частиц их удельная магнитная восприимчивость падает. Известно также, что сила магнитного поля резко снижается с удалением от поверхности барабана или вала. Поэтому при резком различии в крупности разделяемых минералов затрудняется правильный выбор напряженности магнитного поля, параметров рабочей зоны, скоростного режима и производительности сепаратора. Все это приводит к ухудшению технологических показателей обогащения. В ряде случаев улучшить показатели сухой магнитной сепарации удается искусственной сегрегацией материала перед подачей его в рабочую зону сепаратора, которая обеспечивает перемещение более мелких частиц в зону действия большей напряженности поля. Однако лучшие показатели обогащения получаются с применением предварительной классификации материала, максимально сближающей верхний и нижний пределы крупности разделяемых минералов.

Чем больше различаются минералы по их удельной магнитной восприимчивости, тем легче осуществить их разделение в магнитном поле. Селективность магнитного обогащения характеризуется отношением удельной магнитной восприимчивости более магнитного минерала, извлекаемого в магнитный продукт, к удельной магнитной восприимчивости менее магнитного минерала, оставшегося в немагнитном продукте. Чем меньше это отношение, тем труднее осуществить разделение минеральной смеси. Соотношение удельной магнитной восприимчивости разделяемых минералов является основным фактором, определяющим необходимую шкалу предварительной классификации руды перед магнитным обогащением.

Плотность питания сепараторов. На показатели мокрой магнитной сепарации большое влияние оказывает плотность питания или содержание твердого в пульпе. При более высоком содержании твердого в пульпе производительность сепаратора увеличивается, однако качество продуктов обогащения снижается. Увеличение разжиженности пульпы, как правило, обеспечивает повышение качества магнитной фракции, но одновременно возрастают также потери магнитных минералов с хвостами, так как увеличивается скорость прохождения пульпы через рабочую зону сепаратора. Оптимальная плотность питания сепараторов находится в пределах 30—40% твердого.

§ 17. Подготовка руд к магнитной сепарации

Особенности процесса магнитной сепарации обуславливают необходимость подготовки руды перед магнитным разделением, которая в зависимости от характеристики руды (гранулометрический состав, магнитные свойства) и применяемого метода

сепарации (сухая или мокрая) включает в себя следующие операции: дробление, измельчение, грохочение, обесшламливание и обеспыливание, намагничивание и размагничивание, сушка, обжиг.

Грохочение. Магнитное поле в рабочем зазоре сепараторов весьма неоднородно по величине магнитной силы. При подаче в сепаратор руды с широким диапазоном крупности магнитная сила, действующая на частицы наибольшего и наименьшего диаметров, будет различна. Если при сепарации в режиме извлечения (нижнее питание) создать магнитную силу, достаточную для притяжения самого мелкого магнитного зерна, наиболее удаленного от барабана или вала, то с такой же или даже большей силой могут притягиваться крупные зерна с меньшей магнитной восприимчивостью (сростки), которые расположены ближе к барабану или зубьям вала, снижая тем самым качество магнитного концентрата. При сепарации в режиме удерживания (верхнее питание), наоборот, мелкие зерна будут удерживаться сильнее крупных. Поэтому необходимо создавать такие условия, чтобы частицы с различными размерами поперечника и различными магнитными восприимчивостями не притягивались с одинаковой магнитной силой.

Отношение поперечников двух минералов с различными магнитными восприимчивостями, но притягиваемых с одинаковой магнитной силой, называется *коэффициентом равнопритягиваемости*. Чем больше этот коэффициент, тем проще схема обогащения.

При сепарации неклассифицированной руды трудно выбрать правильный режим процесса. Рассев такой руды на узкие классы в соответствии с коэффициентом равнопритягиваемости улучшает условия разделения при сухой и мокрой сепарации.

Размер отверстий сит при грохочении руды перед сухим обогащением на сепараторах с верхним питанием зависит от шага полюсов магнитной системы или шага зубьев вала и отношения магнитных восприимчивостей разделяемых компонентов руды.

При обогащении сильномагнитных руд крупностью — 50+0 или — 25+0 мм предварительное разделение их на классы +6(8) и —6(8) мм благоприятно влияет на показатели магнитного обогащения.

Необходимо при предварительном грохочении перед магнитной сепарацией строго учитывать свойства руды. Например, нельзя рекомендовать применение предварительной классификации, если руда мелкая и грохочение ее связано с большими трудностями, а также, если руда хрупкая, способная к переизмельчению с образованием большого количества илистых шламов.

Обесшламливание и обеспыливание. В этих операциях осуществляется удаление из исходной руды мелких нерудных

частиц (илистых шламов при мокром и пыли при сухом магнитном обогащении). Процесс магнитной сепарации весьма чувствителен к наличию в руде мелко- и тонкоизмельченных частиц, часть из которых попадает при сепарации в магнитный продукт и ухудшает его качество. Это объясняется большой удельной поверхностью тонких частиц и способностью их прилипать к более крупным зернам. При мокрой сепарации из-за сопротивления среды затрудняется движение тонких частиц, что также ухудшает показатели сепарации тонкого материала. Предварительное удаление тонких частиц улучшает условия разделения зернистой части руды. Однако следует правильно выбрать граничный размер частиц, удаляемых в отходы, превышение которого, несмотря на улучшение качества магнитного концентрата, может привести к увеличению потерь металла с удаляемой тонкой фракцией и к снижению общей эффективности обогащения. При сильномагнитных рудах рекомендуется удалять частицы крупностью —5 мкм, при слабомагнитных —10 мкм [3].

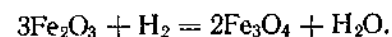
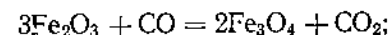
Намагничивание и размагничивание. В процессе магнитной сепарации тонкоизмельченных сильномагнитных материалов происходит интенсивное образование агрегатов (флокул), состоящих из магнитных и механически захваченных немагнитных частиц и сrostков. Явление магнитной флокуляции неизбежно сопровождается также любой способ обогащения тонкоизмельченных сильномагнитных материалов (магнетит, ферросилиций) и непосредственно влияет на эффективность их обогащения. При магнитной сепарации флокуляция повышает производительность сепараторов и извлечение магнитного концентрата, но снижает его качество. При магнитном обесшламливании и сгущении, проводимых в магнитном поле, флокуляция является важным режимным параметром, повышающим производительность и селективность этих процессов, а при классификации, наоборот, она искажает ее результаты и снижает эффективность. Поэтому для интенсификации процесса обесшламливания и сгущения пульпу обрабатывают в намагничивающих устройствах, используя для этого электромагниты или постоянные магниты. И, наоборот, в операциях классификации с целью разрушения флокул пульпу размагничивают, пропуская ее через размагничивающие аппараты. Исследования В. И. Кармазина и В. В. Кармазина показали перспективность подготовки пульпы перед магнитной сепарацией, включающей размагничивание пульпы (отделение мономинеральных частиц от сrostков) и последующую селективную флокуляцию частиц с высоким содержанием магнитного минерала в слабом магнитном поле.

Сушка. На показатели сухой магнитной сепарации вредное влияние оказывает содержание в руде поверхностной влаги, причем это влияние усиливается с уменьшением крупности руды. Например, содержание влаги при сухой сепарации редко-

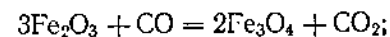
металльных руд крупностью 0,3—0 мм не должно превышать 0,5%. При влажности руды 1—1,5% показатели сепарации резко ухудшаются, а при влажности 2—2,5% обогащение не происходит. В то же время сухая магнитная сепарация марганцевой руды крупностью 3—0 мм, обладающей относительно большой пористостью, удовлетворительно происходит при влажности 3—5%. Эти примеры показывают, что допустимое содержание влаги в руде при сухой сепарации зависит от свойств руды и в каждом конкретном случае должно устанавливаться опытным путем. Процесс сушки требует значительных расходов и, следовательно, очень важно правильно определить оптимальный предел содержания влаги в высушенной руде. Сушка производится в аппаратах различных конструкций. В барабанных сушилках руда перемещается внутри вращающегося барабана и высушивается топочными газами. В трубах-сушилках сушка осуществляется в потоке горячих газов, которые одновременно являются и транспортирующим агентом. Наиболее перспективной является сушка в кипящем слое, которая находит все более широкое применение.

Обжиг. Обжигом называется термический процесс взаимодействия веществ с целью изменения химического состава обжигаемого материала. Одним из видов обжига является магнетизирующий обжиг, которому подвергаются железные руды для перевода немагнитных или слабомагнитных окислов железа в магнитные окислы — искусственный магнетит Fe_3O_4 , маггемит $\gamma - Fe_2O_3$. При этом могут образоваться ферриты различного вида и металлическое железо.

Восстановление окислов железа до магнетита газообразным восстановителем протекает по реакциям



При восстановлении окислов железа до магнетита с применением твердого восстановителя протекают реакции



Обжиг пористых руд (бурые железняки) с использованием газообразного восстановителя производят при температуре 650—750° С, а плотных руд (мартит, сидерит, гематит) — при температуре 850—950° С. Применение твердого восстановителя требует более высокой температуры.

В качестве восстановителей используют коксик, каменный и бурый угли, доменный, генераторный, коксовый и природный газы.

Обжиг руд производится в подовых, барабанных, шахтных печах и печах кипящего слоя. Конструкции и принцип работы этих печей описаны в литературе [6].

Магнитная сепарация предварительно обожженной в восстановительной атмосфере железной руды позволяет получать высокосортные концентраты при малых потерях железа в хвостах, однако высокая стоимость обжига пока еще сдерживает широкое применение обжигмагнитного метода обогащения.

§ 18. Эксплуатация магнитных сепараторов

Правильная техническая эксплуатация магнитных сепараторов на обогатительных фабриках является важнейшим условием их эффективной работы и получения высоких технологических показателей обогащения. В этом параграфе изложены основные обязанности обслуживающего персонала по надзору за технической исправностью узлов сепараторов, поддержанию оптимального технологического режима процесса сепарации и устранению неполадок, которые могут возникнуть в отделениях магнитного обогащения.

К обслуживанию магнитных сепараторов допускаются лица, хорошо изучившие устройство и принцип их работы, технологическую схему обогащения, знающие и умеющие производить регулировку основных режимных параметров процесса сепарации. Сепараторщик магнитных сепараторов должен уметь устранять возникающие в них механические неисправности, не требующие участия ремонтных служб.

Перед пуском сепаратора необходимо внимательно осмотреть все его механические и электрические узлы, доступные для визуального наблюдения, обращая особое внимание на надежность их крепления и возможные механические повреждения. Из рабочей зоны сепаратора необходимо удалить посторонние предметы, проверить герметичность ванны, работу вентиля водоснабжения сепаратора при мокрой сепарации или исправность аспирационной системы при сухой сепарации.

Пуск в работу электромагнитных сепараторов производится в следующем порядке: с помощью реостата устанавливают минимальное значение тока в катушках возбуждения электромагнитной системы, после чего включают электродвигатели привода валков или барабанов. Постепенно увеличивают значение намагничивающего тока в катушках возбуждения до величины, соответствующей технологическому режиму, и, убедившись в нормальной работе сепаратора, подают на него исходное питание. При мокром магнитном обогащении ванны сепаратора необходимо предварительно заполнить водой, а также подать воду в питатель и на брызгала для смыва материала с валков или барабанов. После подачи исходного питания следует отрегулировать водный режим сепарации, не допуская чрезмерно большого расхода воды.

Остановка сепаратора, если она не связана с чрезвычайными обстоятельствами, производится в обратном порядке:

прекращается подача исходного питания, плавно снижается и затем отключается намагничивающий ток, отключаются электродвигатели привода валков или барабанов.

В процессе работы сепараторов основной задачей обслуживающего персонала является соблюдение заданного технологического режима.

При обслуживании мокрых магнитных сепараторов необходимо поддерживать стабильными их производительность и плотность пульпы, следить за сохранением постоянного уровня пульпы в ваннах, работой разгрузочных насадок.

Добавочная вода подается в оба отделения ванны сепаратора обычно вблизи разгрузочных отверстий, что позволяет уменьшить скорость движения пульпы в рабочей зоне и ликвидировать противотоки пульпы из одного отделения в другое, вызывающие засасывание тонких немагнитных частиц в магнитную фракцию, и наоборот.

При работе валковых сепараторов нельзя допускать забивки рабочего зазора и разгрузочных щелей в полюсных наконечниках. Это приводит к резкому ухудшению качества магнитного концентрата, а также к преждевременному износу зубьев валков и полюсных наконечников. Для этого необходимо следить за нормальной работой устройств (грохотов, сеток), предотвращающих попадание в рабочую зону посторонних предметов и крупных кусков руды. При обогащении слабomagнитных руд на сепараторах с сильным магнитным полем забивка разгрузочных щелей может произойти за счет постепенного накопления в них сильномагнитных частиц, которые содержатся в небольшом количестве в руде, или за счет аппаратного железа, случайно попавшего в руду. В этом случае для предварительного удаления из руды сильномагнитных материалов перед сепараторами с сильным полем целесообразно установить барабанные магнитные сепараторы с напряженностью поля 80—90 кА/м.

Если же забивки разгрузочных щелей избежать не удалось, то их необходимо немедленно прочистить при помощи прутка из немагнитного материала, остановив предварительно сепаратор и отключив намагничивающий ток катушек возбуждения.

Часто при наладке валковых сепараторов для обогащения редкометалльных и других слабomagнитных руд осуществляют регулировку длины разгрузочных щелей посредством установки в их входную часть клиньев из резины, меди, алюминия или дерева. Увеличивая таким образом длину рабочей зоны, повышают извлечение магнитной фракции. Необходимо периодически проверять наличие и правильность установки клиньев.

Особенно тщательному осмотру должен подвергаться сепаратор после ремонта. В этом случае следует измерить скорость вращения валков или барабанов, высоту рабочего зазора и напряженность магнитного поля в нем. При отклонении этих

параметров от режимных необходимо выявить причины отклонения и устранить их.

Следует помнить, что валки и полюсные наконечники электромагнитных сепараторов с сильным полем в процессе эксплуатации постепенно изнашиваются, что вызывает увеличение расстояния между ними и снижение магнитной силы поля. Это расстояние должно периодически контролироваться, и при необходимости должна быть произведена замена изношенных узлов.

При работе в одной и той же операции нескольких сепараторов важно равномерно распределить по ним общую нагрузку, в том числе и по ширине рабочей зоны сепаратора, не допуская даже кратковременного превышения установленной технологическим режимом производительности.

Следует осуществлять постоянное визуальное наблюдение за качеством продуктов разделения, применяя в случае необходимости методы инструментального экспресс-анализа, предусмотренные технологической инструкцией для данного обогатительного передела.

Необходимо контролировать показания контрольно-измерительных и сигнальных приборов и при их неисправности немедленно поставить в известность лиц, отвечающих за их работу.

Нельзя допускать механического повреждения изоляции катушек возбуждения, а при работе сепараторов при мокром обогащении попадания на катушки воды или пульпы. Если обмотки погружены в масло, то необходимо периодически проверять его уровень.

Нагрев подшипников, валков, редукторов и электродвигателей не должен превышать $50-60^{\circ}\text{C}$ при мокрой сепарации и $80-90^{\circ}\text{C}$ — при сухой.

В процессе работы сепаратора необходимо следить за наличием постороннего шума в его узлах и механизмах, состоянием смазки трущихся деталей, ограждением вращающихся частей, заземлением.

При обслуживании барабанных сепараторов с магнитными системами, расположенными внутри барабана, положение их контролируется по величине угла на специальном указателе. Необходимо своевременно заменять футеровку барабанов.

При понижении напряженности поля у сепараторов с магнитными системами из постоянных магнитов последние должны быть подвергнуты намагничиванию.

Эффективность работы магнитных сепараторов должна периодически проверяться контрольной сепарацией руды, выход и качество магнитной и немагнитной фракций которой определены заранее.

Основные неполадки, встречающиеся при работе сепараторов, и способы их устранения приведены в табл. 8.

Таблица 8

Основные неполадки при работе сепараторов и способы их устранения

Неполадки	Причины неполадок	Способы их устранения
Остановка барабана или валка	Забивка рабочей зоны крупными кусками руды	Прочистить рабочую зону при разобранной электрической схеме привода и устранить неполадки в работе контрольных грохотов или предохранительных сеток
	Выход из строя приводных звездочек, цепей или ремней, редуктора, электродвигателя, подшипников	Заменить вышедшие из строя детали, узлы и оборудование
	Перегрузка электродвигателя, вследствие чего сработала тепловая защита	Устранить причину перегрузки электродвигателя, которая может возникнуть в результате забивки рабочей зоны посторонними предметами, заклинивания подшипников
	Прекращение подачи электроэнергии в электродвигатель привода	Доложить о случившемся мастеру или диспетчеру
Вращение барабана или валка рывками	Недостаточное натяжение приводных ремней	Подтянуть или заменить приводные ремни
	Частичный износ звездочек или цепей	Подтянуть цепи
При вращении барабана или валка слышен стук	Выход из строя подшипника	Заменить вышедший из строя подшипник
Появление металлического скрежета при вращении барабана или валка	Попадание в рабочую зону крупных кусков руды или посторонних предметов	Прочистить рабочую зону и устранить неполадки в работе контрольных грохотов или предохранительных сеток
Наблюдается повышенный нагрев подшипников	Отсутствие или загрязнение смазки	Промыть подшипник и зарядить его новой смазкой
Падение уровня в ваннах сепаратора	Снизилось давление воды в системе водоснабжения, что подтверждается показаниями манометра	Доложить о случившемся мастеру или диспетчеру
	Забита система водоснабжения сепаратора	Прочистить и промыть рукава и краны
	Чрезмерно увеличился диаметр вставок разгрузочных устройств	Заменить вставки
	Прекращение или уменьшение питания	Установить производительность в соответствии с технологическим режимом

Продолжение табл. 8

Неполадки	Причины неполадок	Способы их устранения
Повышенный перелив пульпы из ванны сепаратора	Повысилось давление воды в системе водоснабжения Забилась разгрузочные отверстия насадок	Отрегулировать подачу воды при помощи общего вентиля Прочистить пасадаки прутком из немагнитного материала или быстрым открытием насадок удалить накопившийся материал
Снижение показателей сепарации	Попадание немагнитного материала в магнитную фракцию вследствие забивки разгрузочных цепей Неправильно установлена делительная перегородка Недопустимо увеличена производительность сепаратора Изменилась высота рабочего зазора	Прочистить рабочую зону Отрегулировать положение делительной перегородки Установить производительность в соответствии с технологическим режимом При помощи регулировочных винтов установить нормальную высоту рабочего зазора
	Нарушена герметизация ванны сепаратора Изменилась скорость вращения барабана или вала Изменилась напряженность магнитного поля в рабочем зазоре	Проверить и отремонтировать уплотнения Привести скорость вращения в соответствие с технологической инструкцией Проверить высоту рабочего зазора, величину намагничивающего тока, правильность подключения обмоток магнитной системы
	Резко изменилась характеристика исходного питания	Необходимо произвести настройку технологического процесса

Глава V

Практика магнитного обогащения

В зависимости от свойств исходного сырья магнитный метод может быть основным (самостоятельным) методом обогащения в технологической схеме фабрики или одним из методов в комбинированных схемах, использующих несколько различных методов обогащения.

Как самостоятельный метод магнитная сепарация приме-

няется при обогащении сильномагнитных (например, магнетитовых) руд с относительно крупной вкрапленностью магнетита. На рис. 35 показана технологическая схема обогащения фабрики № 2 (секция 9—14) Южного горно-обогатительного комби-

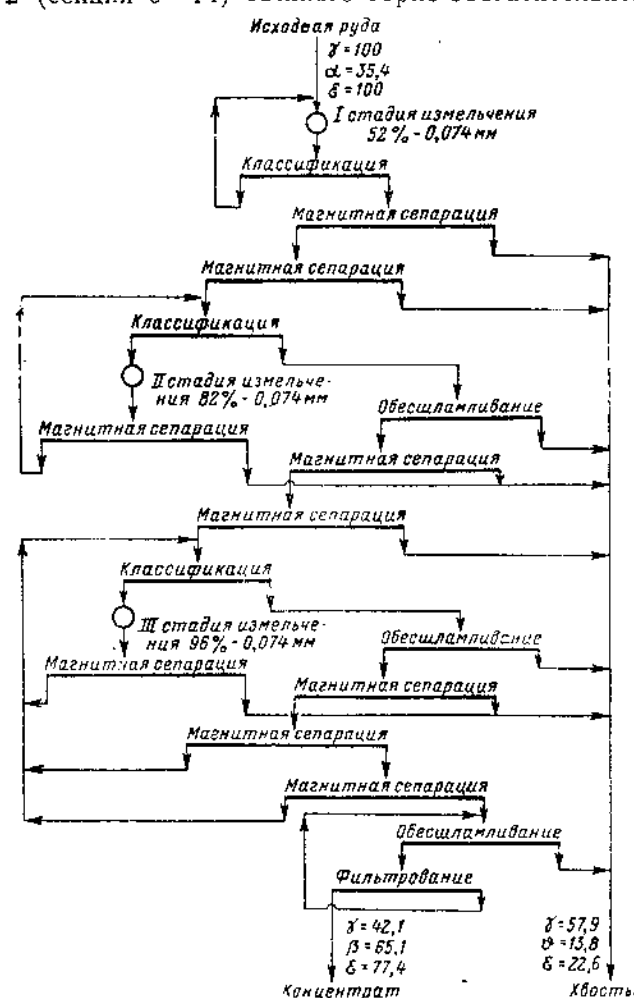


Рис. 35. Технологическая схема обогащения фабрики № 2 ЮГОКа

ната (г. Кривой Рог), где в качестве единственного метода обогащения применяется магнитная сепарация.

На фабрике перерабатываются руды Скелеватского магнетитового месторождения Криворожского железорудного бассейна. Руды представлены главным образом магнетитовыми разновид-

постями роговиков. В руде содержится 35,8% железа: 29% в виде магнетита, 3,6% — гематита и гидроокислов и 3,2% — карбонатов и силикатов. Крупность зерен магнетита до 0,06 мм. Месторождение разрабатывается открытым способом. Максимальная крупность кусков руды 1200 мм.

Технологическая схема обогащения включает четыре стадии дробления руды до крупности 25—0 мм, три стадии измельчения до конечной крупности 96% класса — 0,074 мм и пять стадий мокрого магнитного обогащения.

Дробление руды производится в дробилках ККД-1500/180 (крупное дробление), КРД-900, КСД-2200 (среднее дробление) и КМД-2200 (мелкое дробление). Производительность дробилок равна соответственно 1650, 720, 350 и 350 т/ч.

Дробленая руда из корпуса дробления поступает на I стадию измельчения в шаровых мельницах с центральной разгрузкой МШЦ-3600 × 5500, работающих в замкнутом цикле с односпиральными классификаторами ИКСН-24 (классификатор с непогруженной спиралью). В мельницах руда измельчается до крупности 52% класса — 0,074 мм. Мельницы загружаются шарами диаметром 80—100 мм и работают при плотности пульпы 80—85% твердого. Удельная производительность мельниц по классу — 0,074 мм 1,0—1,1 т/(м³ · ч), циркулирующая нагрузка 100%.

Магнитная сепарация измельченной руды (I стадия обогащения) осуществляется в сепараторах с противоточной ванной ЭБМ-П-80/250. Удельная производительность сепараторов составляет 28—47 т/(м · ч). В этой стадии обогащения удаляется основная масса хвостов (более половины общих хвостов фабрики) с низким содержанием магнитного железа.

II стадия обогащения включает классификацию промпродукта в гидроциклонах диаметром 500 мм, доизмельчение песков гидроциклонов до 82% класса — 0,074 мм в шаровой мельнице МШЦ-3600 × 5500 и один прием магнитной сепарации в сепараторах с противоточной ванной ЭБМ-П-80/250. Хвосты магнитной сепарации направляются в отвал, а магнитная фракция возвращается в гидроциклон. Мельницы загружаются шарами диаметром 60 мм и плотность пульпы в них поддерживается в пределах 70—75% твердого. Удельная производительность мельниц по классу — 0,074 мм 1,0—1,1 т/(м³ · ч). Соотношение диаметров песковой и сливной насадок гидроциклонов равно 0,5, плотность их слива 20—25% твердого. Удельная производительность сепараторов 44—50 т/(м · ч).

Слив гидроциклонов направляется на обесшламливание в магнитных дешламаторах диаметром 5000 мм, песковая фракция которых подвергается двум приемам магнитной сепарации на сепараторах с полупротивоточной ванной ПБМ-ПП-90/250 (III стадия обогащения). Слив дешламаторов и хвосты магнитных сепараторов этой стадии обогащения удаляются в

отвал, а магнитная фракция второго приема сепарации направляется в IV стадию обогащения, которая включает классификацию промпродукта III стадии в гидроциклонах диаметром 350 мм, доизмельчение его в мельницах МШЦ-3600 × 5500 и один прием магнитной сепарации в сепараторах с полупротивоточной ванной ПБМ-ПП-90/250. Измельчение в этой стадии осуществляется до крупности 96% класса — 0,074 мм. Мельницы загружаются шарами диаметром 40—60 мм и работают при плотности пульпы 65—70% твердого. Удельная производительность мельниц по классу — 0,074 мм составляет 0,28—0,31 т/(м³ · ч). Удельная производительность сепараторов — 45 т/(м · ч).

V стадия обогащения включает обесшламливание слива гидроциклонов, три приема магнитной сепарации, обесшламливание и фильтрацию концентрата. Магнитная сепарация осуществляется на сепараторах с полупротивоточной ванной с удельной производительностью 10 т/(м · ч). На фильтрацию поступает пульпа с содержанием 55—60% твердого. Фильтрация осуществляется на дисковых вакуум-фильтрах Ду-68-2,5 при избыточном давлении (вакууме) 0,6 кгс/см² с удельной производительностью 0,5—0,7 т/(м² · ч). Содержание влаги в кеке 10%.

Концентрат частично направляется на агломерацию конвейерным транспортом, частично отправляется потребителям железнодорожным транспортом. Хвосты фабрики направляются самотеком в хвостохранилище, вода из которого полностью используется в качестве оборотной.

Основные технологические показатели: выход концентрата 42,1%, извлечение железа в концентрат: 78,63% общего, 95,14% магнетитового; содержание железа в концентрате 65,1%, в хвостах 13,34% общего, 2,46% магнетитового.

На 1 т исходной руды расход электроэнергии составляет 24,32 кВт · ч, воды 8,82 м³, шаров 1,58 кг, футеровки 0,18 кг, фильтроткани 0,003 м².

На рис. 36 показана технологическая схема обогащения второй очереди фабрики Качканарского ГОКа (Урал). Фабрика перерабатывает руды, представленные тонковкрапленным (десятые и сотые доли миллиметра) магнетитом, а также титаномагнетитом, гематитом и другими рудными минералами (пирит, халькопирит, ванадий). Содержание железа в исходной руде составляет 15—16%. Нерудные минералы представлены главным образом пироксеном, оливином и роговой обманкой.

Технологическая схема обогащения включает одну стадию сухой магнитной сепарации, две (секции 16—20) и три (секции 21—25) стадии измельчения, три (секции 16—20) и четыре (секции 21—25) стадии мокрого магнитного обогащения.

Сухая магнитная сепарация осуществляется на трехбаранных сепараторах ЭБС-90/100 и четырехбаранных сепара-

торах 4ПБС-63/200. Мокрая магнитная сепарация I стадии обогащения производится на сепараторах ПБС-90/250, II — на сепараторах ПБС-П-90/250. Магнитная сепарация III стадии сек-

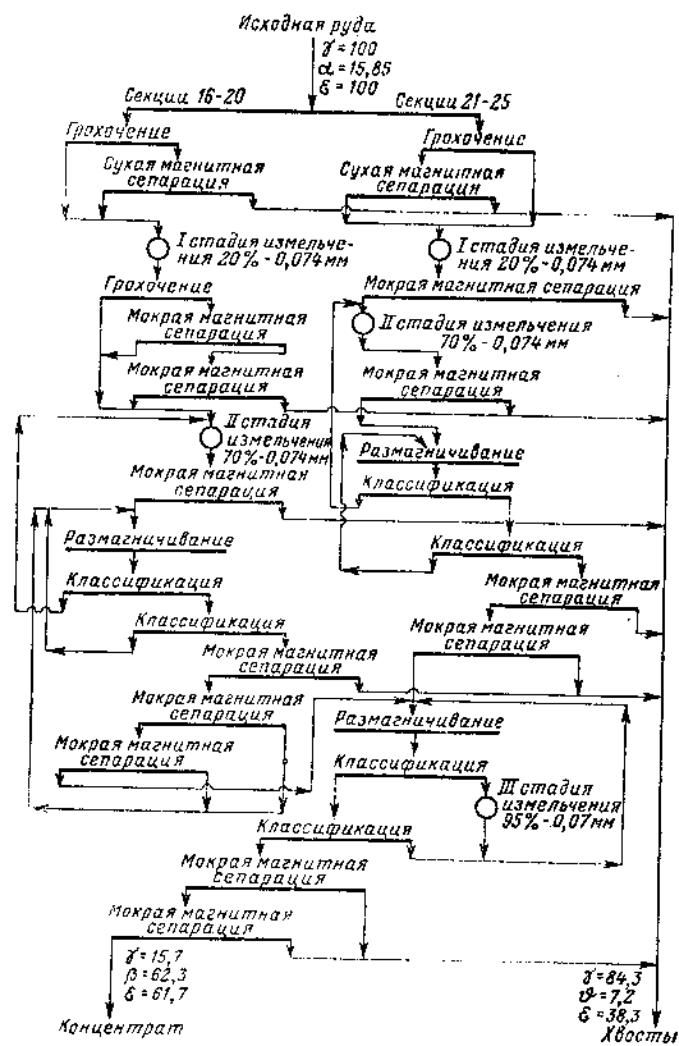


Рис. 36. Технологическая схема обогащения фабрики Качканарского ГОКа

ций 21—25 осуществляется на сепараторах ПБМ-П-90/250, а секций 16—20 — на сепараторах ПБМ-ПП-80/250. Для IV стадии обогащения на секциях 21—25 установлены сепараторы ПБМ-ПП-90/250.

Измельчение производится до конечной крупности 70% (секции 16-20) и 95% (секции 21-25) класса — 0,074 мм в стержневых мельницах МСЦ-3200 × 450 (I стадия), шаровых мельницах МШР-3600 × 5000 (II стадия) и МШР-3300 × 5000 (III стадия).

Классификация материала осуществляется в гидроциклонах диаметром 500 и 350 мм с предварительным размагничиванием пульпы.

Приведенная схема обогащения и применяемое оборудование позволяют из относительно бедных руд получать концентраты с содержанием железа 62,3%, однако извлечение железа в концентрат низкое (61,7%), что объясняется трудной обогатимостью руды.

Конечный концентрат влажностью 9—10% конвейерным транспортом направляется на агломерацию и окомкование, хвосты перекачиваются в хвостохранилище, вода из которого используется в качестве оборотной.

На 1 т исходной руды расход электроэнергии составляет 12,06 кВт · ч, воды 8,3 м³, шаров 0,637 кг, стержней 0,32 кг, футеровки 0,052 кг, фильтроткани 0,002 м² [6].

Для примера комбинированной магнитно-гравитационной технологии обогащения железных руд приведена технологическая схема фабрики Оленегорского ГОКа (рис. 37). Фабрика перерабатывает руды Оленегорского месторождения, представленные железистыми кварцитами. Магнетит и гематит содержатся в руде в виде свободных зерен и сростков друг с другом и с минералами пустой породы.

Технологическая схема обогащения включает двухстадийное измельчение от крупности 25—0 мм (после дробления) до крупности 40% класса — 0,074 мм, магнитно-гравитационное обогащение, обезвоживание и сушку концентрата.

Измельчение руды в I стадии осуществляется в стержневых мельницах с центральной разгрузкой МСЦ-2700 × 3600 с удельной производительностью 1,21 т/(м³ · ч). Измельченная руда вместе с промпродуктами обогащения поступает в двухспиральные классификаторы с непогруженной спиралью 2КСН-20, где производится выделение двух продуктов: мелкого с содержанием 40% класса — 0,074 мм и крупного, который направляется на II стадию измельчения. Циркулирующая нагрузка на классификаторы равна 80—90%. Выход мелкого продукта от исходной руды составляет 45—50%, крупного — 140—145%. II стадия измельчения осуществляется в шаровых мельницах с решеткой МШР-2700 × 4400 с удельной производительностью 1,09 т/(м³ · ч). Слив мельниц II стадии измельчения и классификаторов направляется на основную магнитную сепарацию (сепараторы с противочной ванной ПБМ-П-90/250). Удельная производительность сепараторов до 50 т/(м · ч).

Магнитная фракция подвергается классификации на дуговых грохотах с размером щели 0,6 мм, надрешетный продукт направляется на доизмельчение, а немагнитная фракция после сгущения в гидроциклонах диаметром 350 мм направляется на отсадку в отсадочных машинах МОД-3. Содержание железа в продукте, поступающем на отсадку, составляет 15—20%. На отсадочных машинах получают концентрат с содержанием железа

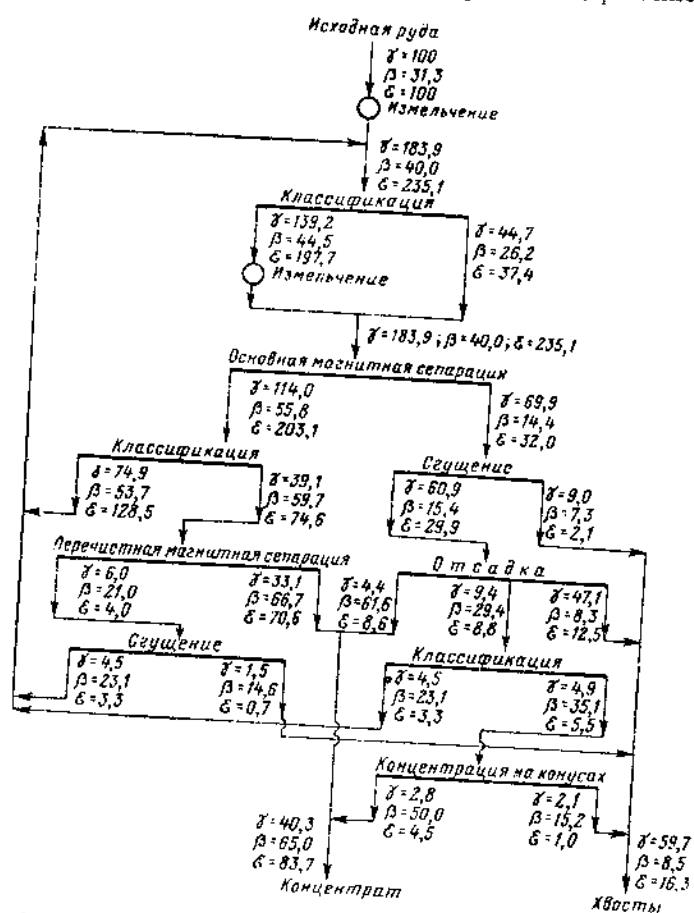


Рис. 37. Технологическая схема обогащения фабрики Оленегорского ГОКа

61—62%, промпродукт и отвальные хвосты с содержанием железа 8—9%. Из промпродукта на дуговых грохотах выделяют нераскрытые сростки, направляемые на доизмельчение, а подрешетный продукт грохотов после сгущения в гидроциклонах диаметром 350 мм поступает на конусные сепараторы, концентрат которых объединяется с концентратом отсадочных машин.

Магнитная фракция основной магнитной сепарации с содержанием 50—55% железа подвергается перечистке на магнитных сепараторах ПБМ-ПП-90/250 до содержания железа 66—67%. Объединенный концентрат магнитного и гравитационного обогащения содержит 65% железа. Извлечение железа в концентрат равно 83,7%. Концентрат отправляется потребителю железно-

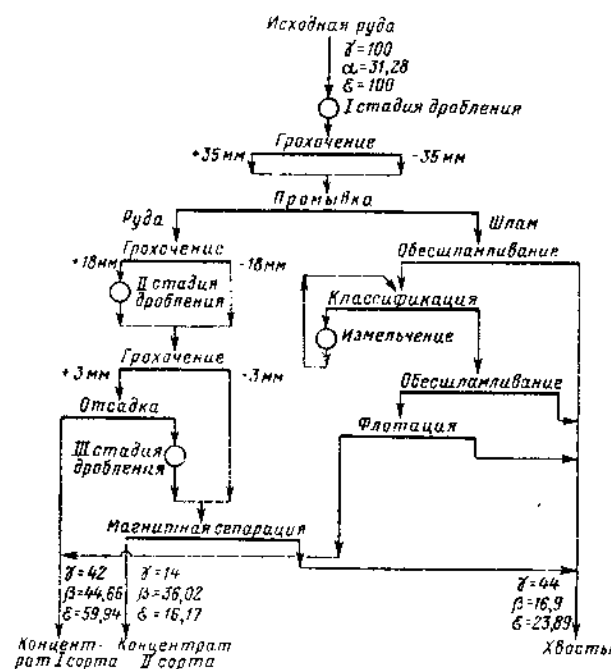


Рис. 38. Принципиальная технологическая схема обогащения Богдановской фабрики Орджоникидзевского ГОКа

дорожным транспортом. Хвосты перекачиваются насосами в хвостохранилище. Около 50% воды из хвостохранилища используется в качестве оборотной.

На фабрике расходуется на 1 т руды [6]: электроэнергии 11,7 кВт·ч, воды 7 м³, шаров 0,372 кг, стержней 0,214 кг, футеровки 0,075 кг.

На рис. 38 показана принципиальная технологическая схема Богдановской обогатительной фабрики Орджоникидзевского ГОКа (УССР). Фабрика перерабатывает марганцевые руды Никопольского месторождения.

Месторождение представлено первичноокисными (53,1%), карбонатными (34,7%) и смешанными (12,2%) рудами, залегающими в виде пласта мощностью 1,5—2,5 м на глубине 75—80 м

в песке и глинах. Основными рудами являются окисные; карбонатные руды не разрабатываются. По минеральному составу руды представлены землисто-кусковатой и кусковато-конкреционной разновидностями псиломелан-манганита и псиломелан-пиролузита. В окисной руде содержится марганца 19,5—37,5%, в карбонатной — 14—24%. Вкрапленность рудных минералов мелкая и тонкая. Нерудные минералы представлены кварцем, кальцитом, глинами и др.

Технологическая схема включает гравитационный, магнитный и флотационный методы обогащения. Исходная руда дробится в двухвалковых зубчатых дробилках 1500×1200 мм до крупности —60 мм и после промежуточного грохочения поступает в промывочную машину «Эксельсиор» 7000×8000 мм. Шламы промывки подвергаются обесшламливанию, доизмельчению в шаровой мельнице МШР-2100×3000 мм, работающей в замкнутом цикле с классификатором, и после удаления из них тонких фракций (<10 мкм) направляются на флотацию.

Флотация осуществляется во флотационных машинах ФМР-25С с получением марганцевого концентрата I сорта и отвальных хвостов.

Мытая руда классифицируется на грохоте на классы +18, 18—3 и 3—0 мм. Класс +18 мм додрабливается на II стадии дробления и совместно с классом 18—3 мм поступает на отсадку в отсадочных машинах «Штаух». Класс 3—0 мм направляется на магнитную сепарацию. Магнитная сепарация осуществляется в сепараторах 5СВК и 2ЭВМ-38/250 (ЭРМ-2). Магнитной сепарации подвергается также промпродукт отсадки после додрабливания его в III стадии дробления.

Основные технологические показатели (в %), получаемые на обогатительной фабрике, следующие [6]:

выход концентрата: I сорта	41—42
II сорта	14—15
содержание марганца в концентрате: I сорта	44,66
II сорта	36,02
извлечение марганца (общее)	76,11

Конечный концентрат направляется на агломерационную фабрику и другим потребителям. Хвосты фабрики самотеком транспортируются в хвостохранилище, вода из которого полностью используется как оборотная.

На 1 т бессортного концентрата (I+II сорта) расходуется: электроэнергии 7,02 кВт·ч, воды 20,38 м³, шаров 4,1 кг, эмульсола 17,2 кг, кубовых остатков 2 кг, сырого таллового масла 3,7 кг.

При обогащении марганцевых руд основной задачей является повышение качества концентратов и извлечения марганца. В связи с этим большое значение приобретает внедрение полиградентной сепарации и химического обогащения.

Раздел второй

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ

Глава VI

Физические основы электрических методов обогащения

§ 19. Общие сведения об электрической сепарации минералов

Электрическое обогащение основано на различии электрических свойств минералов. К этим свойствам относятся: электропроводность, диэлектрическая проницаемость, трибоэлектрический эффект (электризация трением), контактный потенциал, пироэлектрический эффект, пьезоэлектрический эффект.

Электрическая сепарация — это процесс разделения минералов с различными электрическими свойствами, в зависимости от которых под действием электрического поля изменяются траектории движения частиц этих минералов.

Сущность процесса электрической сепарации заключается во взаимодействии электрического поля и минеральной частицы, обладающей определенным зарядом. Для этого минеральные частицы заряжают одним из способов, выбираемым в зависимости от их наиболее контрастных электрических свойств и, используя различие в величинах или знаках получаемых зарядов, осуществляют разделение частиц в электрическом поле.

Применяются следующие способы зарядки частиц сепарируемых материалов: ионизация в электрическом поле коронного разряда; ионизация при помощи α - и β -излучения; электризация трением; индуцирование зарядов; контакт с заряженным электродом; нагрев.

Часто применяются также различные комбинации указанных способов зарядки (например, электризация трением и нагрев, ионизация и контакт с заряженным электродом).

При электрической сепарации используются главным образом различия минералов в электропроводности, диэлектрической проницаемости, электризации трением и адгезии (прилипанию).

Электрическая сепарация применяется для обогащения зернистых сыпучих материалов крупностью от 3 до 0,05 мм, переработка которых другими методами малоэффективна (компоненты близки по плотности, магнитным или физико-хи-

мическим свойствам) или невыгодна с экономической точки зрения.

Наряду с электрическим обогащением применяется также электрическая классификация материала по крупности, которая в ряде случаев является более эффективным процессом по сравнению с чисто гравитационными и центробежными методами классификации (например, классификация слюды, асбеста).

§ 20. Электрическое поле и его свойства

Электрическое поле представляет собой пространство, в котором проявляется действие электрических сил на заряженные тела, причем величина этих сил не зависит от скорости движения заряженных тел. Линии, вдоль которых перемещаются тела в электрическом поле, называются электрическими силовыми линиями.

Плотность потока силовых линий характеризует напряженность электрического поля. *Напряженностью E* электрического поля в точке называется величина, равная отношению силы, с которой поле действует на положительный заряд, помещенный в данную точку поля, к этому заряду, т. е.

$$E = \frac{F}{Q}, \quad (47)$$

где E — напряженность электрического поля;
 F — сила, действующая на заряд;
 Q — величина заряда.

В системе СИ напряженность измеряется либо в ньютонах на кулон (Н/Кл), либо в вольтах на метр (В/м)

$$E = \frac{F}{Q} = \left[\frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Дж/м}}{\text{Кл}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}}{\text{м} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{В} \cdot \text{Кл}}{\text{м} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{В}}{\text{м}} \right].$$

Широко применяются также единицы вольт на сантиметр (В/см) и киловольт на сантиметр (кВ/см).

На рис. 39 показаны различные конфигурации электрических полей.

Между параллельными плоскими полюсами-электродами (рис. 39, *д*) силовые линии параллельны и поле называется *однородным*. При точечных уединенных полюсах (рис. 39, *а*, *б*) силовые линии расходятся по радиусам, а так как площади сферических поверхностей увеличиваются пропорционально квадрату радиуса, то число силовых линий, приходящихся на единицу поверхности, уменьшается пропорционально квадрату расстояния от полюса.

В этом случае электрическое поле называется *неоднородным*. Неоднородность поля характеризуется *градиентом изменения напряженности*

$$\text{grad } E = \frac{dE}{dx}, \quad (48)$$

где $\text{grad } E$ — градиент напряженности электрического поля;
 dE — изменение напряженности в направлении x на отрезке, равном dx .

Единицей градиента напряженности поля в системе СИ служит вольт на квадратный метр (В/м²).

Величина напряженности поля зависит от диэлектрической проницаемости среды, в которой находится поле, температуры и многих других факторов. Для электрической сепарации используются поля с напряженностью около $6 \cdot 10^5$ В/м при напряжениях на электродах $U = 20 - 70$ кВ.

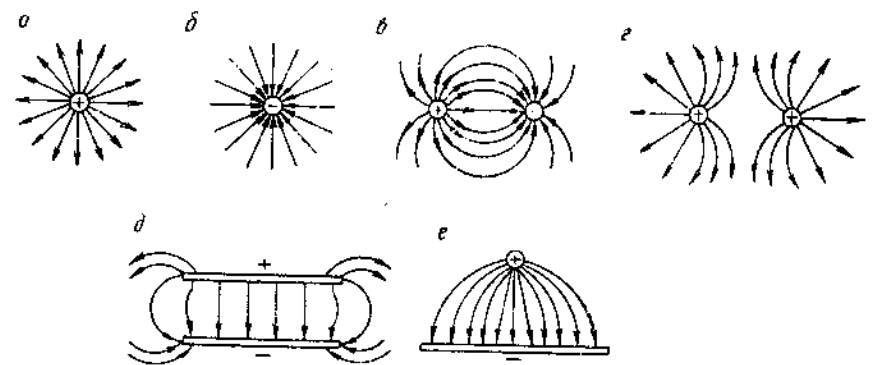


Рис. 39. Конфигурации электрических полей:

а — точечного положительного заряда; *б* — точечного отрицательного заряда; *в* — двух разноименных зарядов; *г* — двух одноименных зарядов; *д* — между разноименно заряженными пластинами; *е* — разноименно заряженных провода и пластины

Заряд частицы, который она получает в электрическом поле, равен произведению силы тока на время, в течение которого шел ток, т. е.

$$Q = It, \quad (49)$$

где Q — электрический заряд, переносимый через поперечное сечение частицы за время t при силе тока I .

Единицей электрического заряда в системе СИ является *кулон* (Кл).

Заряд частиц характеризуется *поверхностной и объемной плотностью*.

Поверхностной плотностью σ заряда называется величина, равная отношению заряда, находящегося на элементе поверхности частицы, к площади этой поверхности, т. е.

$$\sigma = \frac{dQ}{ds} \text{ Кл/м}^2, \quad (50)$$

где dQ — заряд, находящийся на элементарной площадке ds .

Объемной плотностью ρ заряда называется величина, равная отношению заряда, находящегося в элементе пространства, к объему этого элемента, т. е.

$$\rho = \frac{dQ}{dV}, \quad (51)$$

где dQ — заряд, находящийся в элементе объема dV .

Среда, в которой взаимодействуют электрические заряды, характеризуется *диэлектрической проницаемостью* ϵ , которая показывает, во сколько раз сила взаимодействия зарядов в данной среде меньше, чем в вакууме, т. е.

$$\epsilon = \frac{F_0}{F}, \quad (52)$$

где F_0 — сила взаимодействия зарядов в вакууме;

F — сила взаимодействия тех же зарядов в данной среде.

Диэлектрическая проницаемость среды — величина безразмерная.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость ϵ_a диэлектрика — величина, равная произведению диэлектрической проницаемости ϵ диэлектрика и электрической постоянной ϵ_0 , т. е.

$$\epsilon_a = \epsilon \epsilon_0, \quad (53)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная, определяемая опытным путем (например, в системе СИ $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

Единицей измерения абсолютной диэлектрической проницаемости является фарада на метр (Ф/м).

Важной электрической характеристикой проводников является *электропроводность*, т. е. способность проводить электрический ток. Единицей электропроводности в системе СИ служит *сименс* (См). Сименс — электропроводность такого проводника, через который проходит ток в 1А при напряжении на концах проводника в 1В.

Величина, обратная электропроводности, называется *сопротивлением* и измеряется в омах (Ом).

Часто пользуются величинами удельной электропроводности и удельного сопротивления вещества. *Удельная электропроводность* вещества — это отношение плотности тока в веществе к напряженности электрического поля. Единицей измерения удельной электропроводности в системе СИ является сименс на метр (См/м). *Удельным сопротивлением* вещества называется величина, обратная удельной электропроводности. Единицей измерения его служит ом-метр (Ом·м).

При электрической сепарации поля создаются постоянным или пульсирующим током, причем последний изменяется только по величине сил, действующих на частицы, и остается постоянным по направлению.

Известны четыре вида сил, действующих на заряженную частицу в электрическом поле: кулоновская, зеркального отображения, трибоадгезионная и пондеромоторная.

Кулоновской силой называют силу взаимодействия заряда частицы в кулонах и напряженности электрического поля в В/м в той области, где эта частица расположена. Она равна произведению этих величин

$$F_k = QE, \quad (54)$$

где F_k — кулоновская сила взаимодействия, Н;

Q — заряд частицы, Кл;

E — напряженность электрического поля, В/м.

Пример. Рассчитаем величину кулоновской силы, действующей на частицы асбеста и кварца в электрическом поле коронного разряда напряженностью $E = 6 \cdot 10^6$ В/м.

Максимальный заряд, который может возникнуть в минеральной частице, помещенной в электрическое поле коронного разряда, определяется по формуле Мора, вывод которой приведен в литературе [9]:

$$Q_{\max} = 4\pi\epsilon_0 a^2 E \left[\frac{c^2}{a^2} + \frac{2}{3 \left(\frac{1}{\epsilon - 1} + \frac{N}{4\pi} \right)} \right], \quad (55)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная;

E — напряженность электрического поля, В/м;

a и c — параметры, характеризующие размеры и форму частицы и обозначающие соответственно радиус и полуось вращения, м;

ϵ — диэлектрическая проницаемость частицы;

N — коэффициент деполаризации частицы (аналогичен коэффициенту размагничивания). Значения коэффициента N приведены в табл. 9.

Таблица 9
Значения коэффициента деполаризации

Форма частицы	c/a	Направление деполаризации	N
Сфера	1	Параллельно оси c	4/3
Эллипсоид вращения	0,25	Параллельно оси c	3
	0,5	То же	2
	1,0	»	4/3
	2,0	»	0,7
	4,0	»	0,3
	5,0	»	0,23
Тонкие пластины	0	Перпендикулярно плоскости пластины	4
То же	0	В плоскости пластины	0
Правильный цилиндр	0	Параллельно продольной оси цилиндра	0
		Перпендикулярно продольной оси цилиндра	2

Наибольший заряд, который может возникнуть в частице сферической формы, можно определить по формуле Потенье [9]

$$Q_{\max} = 4\pi\epsilon_0 a^2 E \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right). \quad (56)$$

Для расчета примем следующие исходные данные: размер зерен $a = 5 \cdot 10^{-4}$ м, причем для волокон асбеста — $5 \cdot 10^{-4}$ м и $n = 10$, а для зерна кварца — $5 \cdot 10^{-4}$ м и $n = 5$.

Максимальный заряд частиц в электрическом поле напряженностью $E = 6 \cdot 10^5$ В/м составит:

для асбеста [см. формулу (55)]

$$Q_{\max} = 4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 25 \cdot 10^{-8} \cdot 6 \cdot 10^5 \times \\ \times \left[5^3 + \frac{2}{3 \left(\frac{1}{10-1} + \frac{0,23}{4 \cdot 3,14} \right)} \right] = 50,3 \cdot 10^{-11} \text{ Кл};$$

для кварца [см. формулу (56)]

$$Q_{\max} = 4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 25 \cdot 10^{-8} \cdot 6 \cdot 10^5 \times \\ \times \left(1 + 2 \frac{5-1}{5+2} \right) = 3,5 \cdot 10^{-11} \text{ Кл};$$

Кулоновская сила, действующая на частицы, составит: для асбеста

$$F_{\kappa} = 50,3 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^5 = 302 \cdot 10^{-6} \text{ Н};$$

для кварца

$$F_{\kappa} = 3,5 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^5 = 21 \cdot 10^{-6} \text{ Н}.$$

Если отнести эти силы к силам веса, то для округлых зерен кварца в поперечнике $a = d = 5 \cdot 10^{-4}$ м и плотностью $\delta = 2800$ кг/м³ получим

$$\frac{F_{\kappa}}{\frac{\pi d^3}{6} \delta g} = \frac{21 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot (5 \cdot 10^{-4})^3 \cdot 2,8 \cdot 10^3 \cdot 9,81} \approx 12,$$

т. е. кулоновская сила на порядок больше силы тяжести, и такие частицы будут легко отклоняться или извлекаться в электрическом поле.

Рассмотрим разновидность взаимодействия зарядов в электрическом поле, когда заряженная частица соприкасается с заземленной поверхностью. В этом случае заряд частицы вызывает на заземленной поверхности равный по величине индуктивный заряд, но противоположного знака. Заряд, которым обладает частица по истечении некоторого мгновения после контакта с заземленной поверхностью, называется остаточным зарядом, величина которого определяется электропроводностью частицы и другими факторами (подробно см. § 22). За счет остаточного заряда частица будет притягиваться к заземленной поверхности с силой, называемой силой зеркального (электрического) отображения.

По существу сила зеркального отображения является также кулоновской силой, но во взаимодействии здесь участвуют остаточный заряд частицы и вызванный этим зарядом на заземленной поверхности индуктивный заряд.

Сила зеркального отображения способствует более длитель-

ному удерживанию на заземленной поверхности частиц диэлектриков по сравнению с проводниками. Последние благодаря малому переходному сопротивлению быстрее теряют свой заряд и быстрее опадают от нее.

Третий вид взаимодействия электрических зарядов связан с трибоадгезионным эффектом. При электрическом обогащении тонкозернистого материала наблюдается сцепление (адгезия) тонких (<30 мкм) частиц друг с другом, а также прилипание этих частиц к более крупным и к различным заземленным поверхностям.

Несмотря на широкое распространение описанного явления, сущность его до сих пор мало изучена, что обуславливается различной природой сил, вызывающих сцепление частиц, и другими причинами.

Н. Ф. Олофинский [9] считает, что при соприкосновении двух частиц сцепление их вызывается как силами молекулярного взаимодействия, так и электрическими силами. Если соприкасаются разнородные материалы, то на поверхности их раздела возникает трибоэлектричество (электризация трением) — двойной электрический слой, образованный ионами противоположных знаков. При разрыве контакта на одной поверхности остаются положительные, а на другой отрицательные заряды. Заряды могут возникать также и при соприкосновении одинаковых материалов, например, при быстром отрыве пылевидных частиц от пластины, изготовленной из того же материала.

Сила взаимодействия F двух минеральных частиц, возникающая за счет молекулярного сцепления и электризации трением, определяется по формуле

$$F = F_{\text{мол}} + F_{\text{эл}} = A \sigma_s d + 2\pi \sigma^2 S_{\kappa} + \frac{Q_0^2}{l^2}, \quad (57)$$

где $F_{\text{мол}}$ — сила сцепления частиц друг с другом, обусловленная силами молекулярного притяжения;
 A — безразмерный коэффициент, учитывающий форму поверхности в местах контакта частиц, наличие на этой поверхности конденсированной влаги и другие неучтенные факторы;
 δ_s — поверхностное натяжение частиц на границе их раздела с окружающей средой;
 d — средний диаметр частиц;
 $F_{\text{эл}}$ — электрическая сила, возникающая при электризации частиц трением (трибоэлектризация);
 σ — поверхностная плотность заряда частицы;
 S_{κ} — площадь контакта;
 Q_0 — начальный заряд частицы;
 l — расстояние между зарядами.

Кроме этих сил на заряженную частицу, находящуюся в электрическом поле, действует пондеромоторная сила.

Пондеромоторная сила проявляется только в неоднородном электрическом поле, причем ее величина зависит от характера среды. В воздухе она весьма мала, например, по сравнению с силой зеркального отображения. Однако в жидкости с высокой диэлектрической проницаемостью пондеромоторная сила достигает больших значений. Пондеромоторная сила, действующая на частицу, не зависит от направления напряженности поля, так как с изменением его меняется и направление поляризации. Поэтому разделение минералов возможно при переменной полярности электрического поля.

Величина пондеромоторной силы, действующей на частицу шарообразной формы, определяется из уравнения:

$$F_{\text{п}} = \epsilon_1 a^3 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} E \frac{dE}{dx}, \quad (58)$$

где $F_{\text{п}}$ — пондеромоторная сила;

ϵ_1 — диэлектрическая проницаемость среды;

ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость частицы;

a — радиус частицы;

E — напряженность электрического поля;

$\frac{dE}{dx}$ — градиент изменения напряженности электрического поля.

Частицы со значением $\epsilon_2 < \epsilon_1$ будут выталкиваться пондеромоторной силой в направлении уменьшения напряженности поля, а частицы со значением $\epsilon_2 > \epsilon_1$ будут втягиваться в области наибольшей напряженности. Пондеромоторная сила может существенно влиять на траекторию частиц, проходящих вблизи заряженного электрода, а также на поведение частиц в жидких диэлектриках (например, смесь нитробензола с керосином).

§ 21. Электрические свойства руд и минералов

При электрическом обогащении используются присущие минеральным частицам электрические свойства. В отдельных случаях эти свойства частиц могут усиливаться или ослабляться посредством специальной обработки (например, при помощи нанесения на поверхность частиц реагентов).

При электрической сепарации используются главным образом различия минеральных частиц в электропроводности, диэлектрической проницаемости, электризации трением и адгезии. Другие электрические свойства частиц и соответственно основанные на них методы электрической сепарации используются значительно реже.

По электропроводности минералы делятся на три группы:

1) проводники с удельной электропроводностью 10^2 — 10^3 См/м;

2) полупроводники с удельной электропроводностью 10 — 10^{-8} См/м;

3) непроводники (диэлектрики) с удельной электропроводностью $< 10^{-8}$ См/м.

Минералы каждой из этих групп характеризуются определенной величиной удельного сопротивления. К проводникам относятся минералы, обладающие удельным сопротивлением менее 10^9 Ом·м, к непроводникам — более 10^{12} Ом·м.

В соответствии с «зонной теорией» электропроводность твердых тел зависит от строения атома [10].

В любом твердом теле (как в проводнике, так и в непроводнике) имеются электроны, заполняющие все низшие энергетические уровни атома. Такие электроны называют электронами заполненной зоны, они не участвуют в электропроводности. В явлении электропроводности могут участвовать только те электроны, которые находятся на верхних энергетических уровнях, причем в такой зоне, где над уровнями, заполненными электронами, расположены уровни, не заполненные электронами. Электроны, которые обеспечивают проводимость твердого тела, называют электронами зоны проводимости.

Если самая наружная равноэнергетическая поверхность атома заполнена электронами не полностью и переброс электронов из заполненной зоны в зону проводимости не связан с большим скачком энергии, то электроны под действием внешнего электрического поля переходят от атома к атому. Минералы с таким строением атомов называют проводниками. Тепловые колебания кристаллической решетки уменьшают свободный пробег электронов и снижают электропроводность таких минералов.

Величина электропроводности складывается из объемной и поверхностной составляющих. Для одного и того же минерала первая зависит от примесей в нем, а вторая — также и от состояния его поверхности. При нанесении на поверхность минеральных частиц реагентов в виде аэрозолей или растворов можно изменять электропроводность в желаемую сторону. Например, для барита и кварца применяется обработка олеатом натрия, для циркона и апатита — раствором плавиковой кислоты.

К числу минералов-проводников относятся титаномагнетит, ильменит, рутил, пирит и др.

В том случае, когда зона незаполненных электронами энергетических уровней отделена от зоны заполненных уровней большой разностью энергий, электрическое поле, способное сообщить электрону только относительно небольшую дополнительную энергию, не сможет перебросить электрон с занятого им уровня на другой, и такое тело не обладает электропроводностью. Электрическое поле может лишь незначительно изменить энергию электронов и произойдет смещение зарядов или

поляризация частиц диэлектрика. Такие минералы называются непроводниками и имеют очень малую электропроводность.

К минералам-непроводникам относятся циркон, кварц, турмалин и др. Существенная электронная проводимость у диэлектриков обнаруживается только при очень высоких температурах. Среднее положение по электропроводности между проводниками и непроводниками занимает большая группа минералов, называемых полупроводниками. Для полупроводников характерна небольшая разница в энергетическом состоянии близко расположенных зоны проводимости и полностью заполненной электронами зоны. Поэтому, хотя при низких температурах они совершенно не проводят электричества, но уже при небольшом повышении температуры многие электроны в полупроводнике перескакивают в незаполненную зону и полупроводник приобретает электропроводность.

Характерным свойством всех полупроводников является резкое изменение их электропроводности не только при нагреве, но и под действием других внешних факторов, например освещения, облучения быстрыми частицами, давления и др. Этим свойством полупроводниковых минералов пользуются в практике электрической сепарации, подогревая их или облучая частицами распада атомов, излучаемыми изотопами (например, изотопом фосфора $P_0 - 210$).

У полупроводников кроме электронной наблюдается особый вид электропроводности — дырочная, которая проявляется благодаря участию в явлении электрического тока электронов заполненной зоны, когда эта зона вследствие перехода из нее в зону проводимости некоторых электронов становится частично незаполненной. Возникшие на других энергетических уровнях свободные места («дырки») под действием электрического поля заполняются электронами с нижележащих уровней, а вновь образовавшиеся свободные места также заполняются электронами, имеющими еще меньшую энергию. Таким образом, «дырки» как бы перемещаются в направлении, противоположном перемещению электронов, неся с собой положительный заряд. Полный ток в полупроводнике складывается из токов, вызванных электронной и дырочной проводимостью. К полупроводниковым минералам относятся боксит, вольфрамит, ожелезненный циркон и др.

В соответствии с законом Ома электропроводность минеральных частиц равна

$$G = \frac{I}{U} = g \frac{S}{l}, \quad (59)$$

где G — проводимость, См (А/В);
 I — величина тока, А;
 U — приложенная разность потенциалов, В;
 g — удельная электропроводность, См/м;

S — площадь сечения частиц, м²;

l — длина частицы, м.

В электрическом поле проводники и непроводники ведут себя различно. Если поместить проводник в электрическое поле, то на его поверхности появляются электрические заряды, причем на одном конце проводника появляется избыток электронов (отрицательный заряд), а на другом — наблюдается недостаток электронов (положительный заряд). При удалении проводника из электрического поля оба противоположных заряда уравниваются и тело становится незаряженным. При контакте проводника с заряженным телом вследствие хорошей проводимости проводник приобретает одноименный заряд и отталкивается от заряженного тела.

Сила, в которой взаимодействуют два заряда, согласно закону Кулона прямо пропорциональна произведению величин зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и диэлектрической проницаемости среды

$$F_{\text{н}} = \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon r^2}, \quad (60)$$

где Q_1 и Q_2 — величины взаимодействующих зарядов;

r — расстояние между зарядами;

ϵ — диэлектрическая проницаемость среды.

По-другому ведут себя в электрическом поле диэлектрики. В каждой молекуле диэлектрика находятся одновременно и положительные и отрицательные заряды, причем в любом объеме диэлектрика общий положительный заряд равен отрицательному заряду. Можно сказать, что молекула диэлектрика содержит в себе парные электрические заряды и является электрическим диполем.

Если поместить диэлектрик в электрическое поле, то под действием поля происходит лишь смещение зарядов и ориентация электрических диполей в направлении напряженности поля. На поверхности диэлектрика появляются заряды: с одного конца положительные, с другого — отрицательные. Процесс смещения зарядов в диэлектрике под действием электрического поля носит название поляризации, а заряды, появляющиеся на поверхности поляризованного диэлектрика, называются связанными зарядами.

Под связанными зарядами принято понимать электрические заряды, входящие в состав вещества и удерживаемые в определенных положениях внутримолекулярными силами.

Поляризация — это упорядоченное изменение расположения связанных зарядов в диэлектрике, вызванное электрическим полем. Это изменение расположения проявляется в том, что отрицательные связанные заряды в диэлектрике переместятся в направлении более высокого потенциала, а положительные

связанные заряды переместятся в сторону более низкого потенциала.

Поляризуемость диэлектрика характеризуется диэлектрической проницаемостью ϵ , которая показывает, во сколько раз сила взаимодействия зарядов в данном диэлектрике меньше, чем в вакууме [см. формулу (52)].

Предположим, что два противоположно заряженных шарика взаимодействуют друг с другом в вакууме. Поместим эти же шарики в диэлектрическую жидкость, например в керосин, диэлектрическая проницаемость которого равна двум. Сила взаимодействия между шариками уменьшится приблизительно вдвое. Это уменьшение силы взаимодействия вызвано поляризацией керосина: у поверхности положительно заряженного шарика сосредоточиваются отрицательные заряды молекулярных диполей керосина, а около отрицательно заряженного шарика — положительные заряды. Уменьшение силы взаимодействия заряженных тел в среде и учитывается в законе Кулона введением диэлектрической проницаемости среды.

Таким образом, диэлектрическая проницаемость является важной физической константой неэлектропроводных веществ.

Величина поляризации диэлектрика пропорциональна напряженности электрического поля E :

$$P = kE, \quad (61)$$

где P — интенсивность поляризации (поляризованность);

k — коэффициент пропорциональности или диэлектрическая восприимчивость.

Приближенно можно считать, что чем лучше тело проводит электрический ток, тем больше его диэлектрическая проницаемость. Диэлектрическая проницаемость в значительной степени зависит от влажности минералов (увеличивается пропорционально) и от наличия примесей.

В приложении 7 приведена характеристика некоторых минералов по их электрическим свойствам, используемым при электрическом обогащении.

§ 22. Способы зарядки минеральных частиц

Для большинства применяемых в обогащении методов электрической сепарации важное значение имеет зарядка, или поляризация, минеральных частиц. Рассмотрим способы зарядки минеральных частиц в такой последовательности, которая соответствует распространенности этих способов в практике электросепарации и эффективности процесса зарядки.

Зарядка ионизацией. Наибольшее распространение получил способ зарядки минеральных частиц в поле коронного разряда. Напомним, что коронный разряд является разновидностью электрического разряда в газах. Если подключить к источни-

ку тока два электрода, разделенные газовым (воздушным) промежутком, то при достаточной мощности источника тока между электродами можно получить коронный, искровой разряды или электрическую дугу. Несмотря на то, что любой газ является идеальным диэлектриком, между электродами появляется электрический ток. Причина этого явления заключается в ионизации газа (воздуха), находящегося в промежутке между электродами, в результате чего в газе появляются носители электрических зарядов (положительно или отрицательно заряженные ионы и электроны).

Сущность ионизации состоит в отщеплении электронов от нейтральной молекулы и в присоединении некоторой части свободных электронов к нейтральным молекулам и атомам. В результате молекулы, потерявшие один или несколько валентных (периферийных) электронов, становятся положительными ионами, а молекулы, присоединившие один или несколько электронов, превращаются в электроотрицательные ионы. Таким образом, носителями электрических зарядов в ионизированном газе являются как свободные электроны, так и электроположительные и электроотрицательные ионы.

Ионизация газа может быть вызвана разнообразными явлениями, при которых молекулам газа сообщается энергия, достаточная для отрыва электронов.

Различают две разновидности ионизации газа между электродами:

1. Ионизация газа возникает вследствие действия на него различных ионизаторов, например рентгеновских лучей, радиоактивных веществ, температуры. Для этого вида ионизации характерным является то, что с прекращением действия ионизатора начинается обратный процесс, т. е. рекомбинация (воссоединение) ионов и электронов в нейтральные молекулы, и прохождение тока через газ прекращается. Это самостоятельный газовый разряд.

2. Ионизация газа возникает вследствие достаточно высокой разности потенциалов на электродах, и начавшийся разряд сам создает необходимые для его поддержания ионы. В этом случае ток не прекращается при прекращении действия ионизатора, и такой разряд называют самостоятельным газовым разрядом.

В практике электрической сепарации применяют только самостоятельную ионизацию.

К самостоятельным газовым разрядам относится и коронный электрический разряд.

Коронный разряд можно назвать неполным пробоем газа между электродами, который в отличие от полного пробоя газа при искровом разряде возникает в небольшой области вблизи тонкого или заостренного электрода. Если на два электрода, один из которых имеет малый радиус кривизны

(провода, острие и т. п.), а другой выполнен в виде плоскости или пустотелого цилиндра, наложить некоторую разность потенциалов, то напряженность поля у первого электрода будет значительно выше, чем в остальном межэлектродном пространстве. При достаточно высокой разности потенциалов вблизи тонкого электрода начнется ионизация газа (воздуха). При этом воздух благодаря появлению носителей электрических зарядов,двигающихся в соответствующих направлениях вдоль силовых линий электрического поля, частично теряет свои изолирующие свойства, и между электродами проходит электрический ток. Вблизи тонкого электрода наблюдается фиолетово-голубое свечение газа и слышится характерное шипение, что свидетельствует о появлении коронного разряда (короны).

Свечение газа в данном случае вызывается рекомбинацией ионов и возбуждением нейтральных молекул, с которыми сталкиваются разогнанные электрическим полем электроны или ионы. В результате этих столкновений часть молекул не ионизируется, а переводится в «возбужденное состояние» (вызываются изменения в движении электронов, вибрация атомных ядер) и отдает свою избыточную энергию в виде светового излучения. Это явление благодаря большой скорости распространения излучения способствует повышению электропроводности газа.

Электрод, вблизи которого возникает свечение газа, называется *коронирующим электродом*, а светящаяся область, прилегающая к коронирующему электроду, коронирующим слоем (чехол короны). В чехле короны одновременно происходит как ионизация, так и восстановление газовых молекул (рекомбинация). Этот процесс стремится к равновесию, т. е. к состоянию, при котором в единичном объеме околоэлектродного пространства содержалось бы одинаковое количество положительного и отрицательного электричества. Таким образом, в этой области существуют заряды обоих знаков.

Кроме внутреннего (светящегося) чехла короны в межэлектродном пространстве имеется внешняя (невидимая) область коронного разряда. В этой области ионизация газа не происходит, а происходит лишь перемещение в определенном направлении молекул газа под действием движущихся ионов.

Это перемещение газа в сторону заземленного электрода называют «электрическим ветром». Электрический ветер выравнивает концентрацию ионов в межэлектродном пространстве, способствуя тем самым лучшей зарядке частиц.

Внешняя область коронного разряда имеет только заряды одного знака (униполярные). Объясняется это тем, что коронирующий электрод поглощает ионы противоположного с ним знака, а избыточное количество одноименно заряженных ионов выталкивается во внешнюю область и направляется к противоположному (заземленному) электроду. Эти ионы образуют во

внешней зоне объемный заряд того же знака, что и заряд коронирующего электрода.

Из изложенного следует, что электрический ток при коронном разряде в газе переносится зарядами того же знака, каким заряжен коронирующий электрод.

Напряженность электрического поля и напряжение, при которых появляется коронный разряд в газе, называются соответственно *критической, или начальной, напряженностью и критическим напряжением*.

Начальную напряженность поля короны для концентрических цилиндров (цилиндра и провода) можно рассчитать по эмпирической формуле [9].

$$E_k = 31\delta \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}}\right), \quad (62)$$

где E_k — напряженность поля, при которой возникает коронный разряд, кВ/см;

δ — относительная плотность воздуха (при давлении 760 кгс/см² и температуре 25° С $\delta=1$);

r — радиус коронирующего провода, см.

Начальное напряжение U_k (кВ) для случая коронного разряда между проводом и параллельной плоскостью выражается формулой

$$U_k = E_k r \ln \frac{2h}{r}, \quad (63)$$

где h — расстояние между плоскостью и коронирующим проводом, см.

Если после появления короны продолжать увеличивать напряжение, то коронный ток возрастет и при определенном напряжении между электродами начнут проскакивать искры — наступает искровой пробой газового промежутка, а затем появляется электрическая дуга. Напряжение, при котором наблюдается частое проскакивание искр между электродами, называется *напряжением искрового пробоя*, или *искровым потенциалом*, а напряжение, при котором возникает электрическая дуга, называется *пробивным*.

Различают положительную корону, когда коронирующему электроду сообщают положительный потенциал, и отрицательную корону — при наложении отрицательного потенциала.

Отличить положительную корону от отрицательной при проволочном электроде можно по характеру его свечения. В случае наложения на коронирующий электрод положительного потенциала свечение его будет равномерным по всей длине, а при отрицательном потенциале — свечение сосредоточивается в отдельных узлах.

Практические наблюдения показывают, что пробивное напряжение при отрицательном потенциале коронирующего электрода выше, чем при положительном, поэтому, если это не

ухудшает технологических показателей обогащения, отрицательный заряд короны предпочитают положительному.

Количество ионов, переносящих заряды, пропорционально величине коронного тока I (мА/м), который для электродов, имеющих форму провода и плоскости, пропорционален рабочему напряжению и определяется по формуле [9]

$$I = \frac{0,78k}{9k^2 \ln \frac{2h}{r}} (U - U_*) U, \quad (64)$$

где U — напряжение на коронирующем проводе;

k — коэффициент, характеризующий подвижность ионов.

Остальные обозначения приведены выше.

Подставляя обычные значения величин, получим, что величина коронного тока приблизительно равна 0,2 мА/м. Зависимость коронного тока от числа проводов экстремальна: максимум достигается при 4—6 проводах, в дальнейшем коронный ток уменьшается, так как коронирующие провода экранируют друг друга. Из этого следует, что поток ионов следует фокусировать, чтобы лучше использовать их энергию. Коэффициент использования коронного разряда, т. е. отношение тока короны к общему току выпрямительной установки для игольчатых электродов больше, чем для проволочных (0,79 против 0,65).

С увеличением коронного тока растет количество ионов, которые стекают с большой скоростью (до 100 м/с) в сторону заземленного электрода, и поэтому увеличивается и скорость молекул газа, увлекаемых ионами и полем и образующих электрический ветер. Это явление полезно при зарядке частиц в поле короны, так как интенсивнее передвигает их и быстрее доводит заряд до предельного.

Величина тока коронного разряда зависит главным образом от напряжения между электродами, формы и размеров коронирующего электрода и расстояния между коронирующим и заземленным электродами. С уменьшением расстояния между электродами и увеличением напряжения ток коронного разряда возрастает. Ток возрастает также при уменьшении радиуса кривизны коронирующего электрода (чем более острые их грани, тем больше коронный ток).

Таким образом, коронный разряд в газе представляет собой электрическое поле, в котором существуют объемные заряды. Если во внешнюю область коронного разряда поместить минеральную частицу, то на ней будут адсорбироваться (закрепляться) заряженные ионы. При прочих равных условиях количество закрепившихся на частице ионов будет тем больше и частица получит тем больший заряд (за одно и то же время пребывания в поле коронного разряда), чем больше плотность униполярного объемного заряда, т. е. чем больше величина коронного тока.

Процесс адсорбции заряженных ионов на частице продолжается не беспрестанно. Поскольку минеральная частица, адсорбируя ионы, становится заряженным телом, вокруг нее создается электрическое поле, которое вначале противодействует, а затем и полностью прекращает процесс закрепления на частице заряженных ионов. Это наступает тогда, когда напряженность поля, созданного зарядом частицы, становится равной напряженности поля коронного разряда в той точке, где расположена частица.

Величина предельного заряда, который может получить минеральная частица в поле коронного разряда, определяется по ранее приведенным формулам (55) и (56). По данным Н. Ф. Олофинского, зарядка частиц до максимального заряда происходит почти мгновенно (0,01 с). Величина заряда минеральных частиц измеряется различными методами, описанными в физике. Обычно измерительная установка состоит из изолированного металлического приемника, в который помещают заряженные частицы, и электрического вольтметра.

Электризация трением и при контакте с заряженной поверхностью. Ранее было установлено, что потертый о шерсть кусок янтаря приобретает свойство притягивать пушинки или другие легкие предметы. От греческого слова электрон (янтарь) и был впоследствии образован термин «электричество». В дальнейшем установлено, что в определенных условиях при трении друг о друга электризуются все физические тела, получая при этом различные по величине и знаку заряды трения. Причем одно и то же тело может получать различный по величине и знаку заряд в зависимости от физических свойств другого, контактирующего с ним тела. Например, металлы при трении их о стекло электризуются отрицательно, а при трении о каучук — положительно. При трении разнородных тел друг о друга они заряжаются равными по величине, но разноименными по знаку электрическими зарядами.

Исследованиями В. В. Петрова, Н. А. Гезехуса, Козна установлено, что величина и знак заряда трения зависят от твердости, плотности, диэлектрической проницаемости трущихся тел, состояния их поверхности, температуры и других причин.

Физическая сущность явления электризации трением, по представлениям современной физики твердого тела, в частности зонной теории строения тел, заключается в переходе носителей электрических зарядов от одного контактирующего тела к другому, в результате различной концентрации в них носителей зарядов.

Электризация двух тел, происходящая при их контакте, является результатом обмена зарядами — внешними электронами. Каждое твердое вещество можно характеризовать энергией, которую необходимо затратить на отрыв одного из

внешних электронов и перемещение его на достаточно большое расстояние.

Эта энергия называется работой выхода электрона и измеряется в э·В (электрон-вольт). При соприкосновении двух разнородных проводников на границе их соприкосновения возникает характерная для каждой пары проводников разность потенциалов, называемая контактной разностью потенциалов. Между проводниками возникает поток электронов, который продолжается до тех пор, пока произойдет выравнивание потенциалов соприкасающихся проводников. При этом в зоне контакта проводников возникает двойной электрический слой: на поверхности одного проводника накапливаются положительные заряды, а на поверхности другого — отрицательные. Контактная разность потенциалов возникает при соприкосновении не только двух разнородных проводников, но и проводника с диэлектриком, а также при соприкосновении двух диэлектриков.

Таким образом, электризация тел при трении возникает вследствие контактной разности потенциалов соприкасающихся тел. Трение способствует процессу электризации, обеспечивая последовательно тесное соприкосновение различных точек поверхностей тел.

Знак заряда, получаемого телами при трении их друг о друга, определяется в соответствии со значением работы выхода электронов этих тел: при относительно высоком значении работы выхода электроны приобретаются и тело заряжается отрицательно, при низком значении — электроны теряются и тело получает положительный заряд.

Для приближенного определения знака заряда трения можно пользоваться правилами Коэна (положительно заряжается тот диэлектрик, диэлектрическая проницаемость поверхностных слоев которого больше) и Гезехуса (положительные трибоэлектрические заряды приобретает то из двух трущихся тел, плотность и твердость которого больше).

Величина заряда трения возрастает пропорционально увеличению разницы между работой выхода электронов трущихся тел. Однако в конечном счете электропроводные минералы (пирит, ильменит, галенит) вследствие частичного рассеивания электронов сохраняют лишь весьма малые заряды, в то время как слабоэлектропроводные минералы (кварц, флюорит) сохраняют при тех же условиях относительно большие заряды. Имеют значение также форма и площадь контакта частиц. У диэлектриков при окатанной форме заряды намного больше, чем при остроугольной, потому что заряды в этом случае остаются сосредоточенными только в точках контакта («точечный контакт»). У проводников заряд распространяется по всей поверхности частицы, поэтому влияние ее формы незначительно.

Рассеивание заряда возрастает при наличии острых граней. Оно менее значительно у проводников по сравнению с диэлек-

триками, поскольку у последних заряды сосредоточены на остриях.

Следует отметить, что на знак и величину зарядов трения минералов оказывает влияние большое число факторов (состояние поверхности, наличие примесей, способ трения, внешние условия), которые могут вызвать не только изменение величины, но и знака заряда одного и того же минерала. Таким образом, знак и величину заряда нельзя считать абсолютной характеристикой данного минерала, а необходимо ее определять в каждом конкретном случае.

Явлением трибоэлектризации минеральных частиц объясняется различное их поведение в электростатическом поле. В 1936 г. Джонсоном экспериментально было установлено, что одни минеральные частицы в электростатическом поле всегда отклоняются в сторону положительно заряженного электрода, другие — в сторону отрицательно заряженного электрода, а часть минералов не реагирует на перемену полярности электродов. Первые минералы были названы обратимыми положительно (ОП), вторые — обратимыми отрицательно (ОО) и третьи — необратимыми. Н. Ф. Олофинский объяснил это явление тем, что первые и вторые минералы имеют знаки трибоэлектрического заряда, обратные знаку электродов, к которым они отклоняются, а не отклоняющиеся частицы не имеют или имеют весьма малые заряды трения.

Электризацию минеральных частиц можно произвести также методом их контакта с заряженным электродом. При соприкосновении частиц различной электропроводности с заряженным электродом они получают разные по величине заряды. Минералы с относительно высокой электропроводностью через некоторое время приобретают одноименный с электродом заряд и отталкиваются от него, в то время как частицы диэлектриков остаются притянутыми к электроду. Объяснение этому явлению дано в § 21. Различное поведение проводников и диэлектриков на заряженной поверхности широко используется для их разделения в электрическом поле.

Все остальные методы зарядки частиц в практике электрического обогащения имеют незначительное распространение.

Установлено, что небольшое число минералов (точнее, их кристаллов) обладают свойством электризоваться при изменении температуры. Это явление носит название *пироэлектрического эффекта*. Если, например, нагревать кристалл турмалина, то на его концах появятся разноименные электрические заряды. Таким же свойством обладают борцит, кварц и некоторые другие минералы. Подвергая такие минералы нагреву, можно увеличить разницу в зарядах разделяемых минералов и вести процесс электрической сепарации с большей эффективностью.

С этой же целью иногда применяется облучение минеральных частиц радиоактивными изотопами (например, изотоп

фосфора $P_0 - 210$), которое вызывает у ряда полупроводников появление электрического заряда и, кроме того, интенсифицирует зарядку частиц в поле коронного разряда, существенно снижая критическое напряжение короны.

Некоторые минералы (кварц, сфалерит) электризуются, будучи подвергнуты механическому воздействию (растяжение — сжатие). Зарядка частиц происходит вследствие пьезоэлектрического эффекта. Заряды возникают в этом случае благодаря наличию в минералах электрических диполей, расположенных в определенных кристаллографических направлениях. Сближение при сжатии или удаление диполей при растяжении изменяет суммарный электрический момент, что приводит к появлению или изменению у частиц электрических зарядов.

Электризация некоторых частиц наблюдается при действии на них света (оптическая или фотоэлектризация). Так заряжают, например, частицы горного хрусталя. Еще реже для зарядки применяется термоэлектричество. Оно возникает при нагревании мест соприкосновения двух различных кристаллов (термопар) благодаря разному числу свободных электронов и различному значению работы выхода электронов. Например, в ряде Al, Zn, Sn, Cd, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd каждый предыдущий элемент при соприкосновении с последующим и нагревании электризуется положительно.

§ 23. Динамика процесса электрической сепарации минералов

Процесс разделения минеральных частиц в электрическом поле осуществляется либо за счет удерживания заряженных частиц на поверхности заземленного вращающегося электрода (режим удерживания), либо в результате отклонения их в сторону электрода, обладающего противоположным по отношению к частицам потенциалом (режим извлечения).

Режим удерживания. Поведение частиц при разделении в режиме удерживания рассмотрим на примере работы барабанного коронно-электростатического сепаратора, рабочая зона которого и векторная диаграмма сил, действующих на частицу, находящуюся на поверхности заземленного (осадительного) электрода, показаны на рис. 40.

Смесь минеральных частиц поступает из бункера 3 на вращающийся осадительный электрод 4, который транспортирует частицы в зоны действия отклоняющего и коронирующего электродов 1, 2. В зоне электрода 2 все частицы приобретают электрический заряд, одноименный по знаку с потенциалом коронирующего электрода, и за счет взаимодействия электрических сил притягиваются к заземленному осадительному электроду. Дальнейшее поведение частиц определяется степенью их электропроводности. Электропроводные частицы (проводники)

быстро отдают свой заряд осадительному электроду и центробежной силой сбрасываются с поверхности барабана в бункер 8 для проводящей фракции. Частицы, обладающие ничтожной электропроводностью, медленно разряжаются на осадительном электроде и, удерживаясь на нем более длительное время, выносятся в сторону, противоположную зоне действия коронирующего электрода. Часть разрядившихся частиц отрывается от барабана, а остальные счищаются с него при помощи

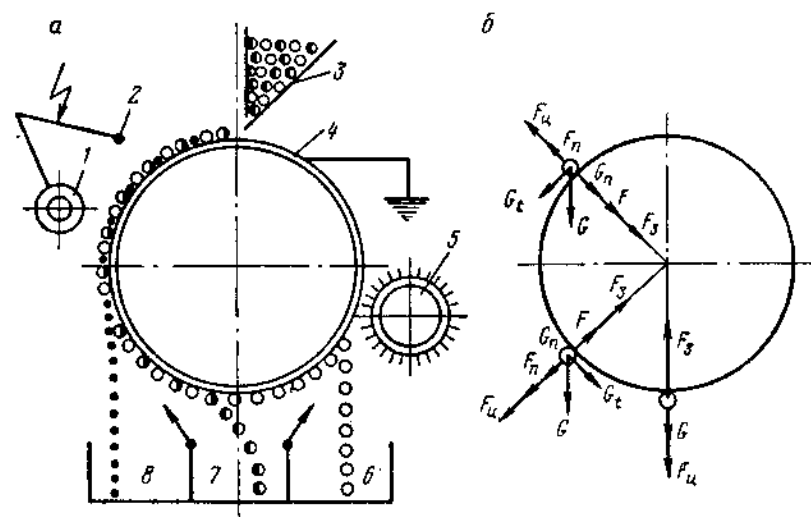


Рис. 40. Принципиальная схема барабанного коронно-электростатического сепаратора

а — схема устройства; б — диаграмма сил, действующих на частицы минералов

щетки 5 и разгружаются в бункер 6 для непроводящей фракции. Частицы с промежуточной электропроводностью разряжаются быстрее непроводящих и, отрываясь от поверхности осадительного электрода в его нижней части, попадают в бункер 7 для промпродукта.

Изложенный процесс разделения минеральных частиц по электропроводности в сущности является идеальным и практически в той или иной степени нарушается, так как зарядка и разрядка частиц происходят в многослойном потоке, т. е. в неодинаковых для всех частиц условиях. Поэтому в каждом из трех продуктов могут оказаться частицы с различным значением электропроводности, что приводит к взаимозасорению продуктов и снижению их качества.

Рассмотрим более подробно процессы зарядки и разрядки частиц, находящихся на осадительном электроде. Учитывая мгновенные зарядку и притяжение частиц к осадительному электроду, нетрудно видеть, что в зоне действия корониру-

шего электрода процессы зарядки и разрядки частиц происходят одновременно. Ясно, что в этих условиях (в случае идеальных проводников и диэлектриков) накопление максимального заряда можно было бы получить только у диэлектриков, так как у проводников утечка заряда происходила бы в то же мгновение, что и зарядка. Однако реальные минеральные частицы, разделяемые при помощи электрической сепарации, не являются ни идеальными проводниками, ни идеальными диэлектриками. Поэтому каждая частица в конечном итоге будет иметь определенный *остаточный заряд*, характерный для того момента, когда процессы зарядки и разрядки уравниваются друг друга. У частиц с высокой электропроводностью величина этого заряда будет значительно меньше, чем у диэлектриков. Разницей в величинах остаточных зарядов и определяется эффективность процесса разделения в коронно-электростатическом сепараторе: чем больше эта разница, т. е. чем сильнее частицы отличаются по электропроводности, тем эффективнее они разделяются.

Из рис. 40, б видно, что на частицу, находящуюся на поверхности осадительного электрода, действуют следующие силы:

1. Сила взаимодействия электрического поля с остаточным зарядом частицы, действующая в зоне коронного разряда и прижимающая частицу к поверхности осадительного электрода F

$$F = Q_R E, \quad (65)$$

где Q_R — величина остаточного заряда;

E — напряженность электрического поля коронного разряда.

Величина остаточного заряда зависит от переходного сопротивления частицы R , определяемого суммой собственного сопротивления частицы и контактного сопротивления между частицей и барабаном [9]

$$Q_R = \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) a^2 E \mu(R), \quad (66)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость частицы;

a — радиус сферической частицы;

E — напряженность поля коронного разряда;

$\mu(R)$ — функция сопротивления частицы, равная нулю при R очень малом (но $R > 0$) и единице при $R \rightarrow 0$.

Таким образом, сила взаимодействия электрического поля с остаточным зарядом частицы

$$F = Q_R E = \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) a^2 E^2 \mu(R). \quad (67)$$

2. Сила зеркального отображения F_s , возникающая в результате взаимодействия остаточного заряда частицы и индуцированного на осадительном электроде электрического заря-

да, равного по величине остаточному заряду, но противоположного ему по знаку. Эта сила прижимает также частицу к поверхности осадительного электрода и равна

$$F_s = \frac{Q_R^2}{a^2} = \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right)^2 a^2 E^2 \mu^2(R). \quad (68)$$

3. Пондеромоторная сила F_n , возникающая в результате неоднородности электрического поля коронного разряда и стремящаяся оторвать частицу от поверхности осадительного электрода в сторону максимальной неоднородности поля, т. е. в направлении к коронирующему электроду

$$F_n = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} a^3 E \frac{dE}{dx}, \quad (69)$$

где $\frac{dE}{dx}$ — градиент напряженности электрического поля коронного разряда.

Величина этой силы по сравнению с другими силами ничтожно мала, так как вблизи поверхности осадительного электрода электрическое поле приближается к однородному ($\frac{dE}{dx} \rightarrow 0$).

4. Центробежная сила F_n , возникающая при вращении осадительного электрода и действующая на частицу в направлении от оси электрода нормально к его поверхности

$$F_n = \frac{2mv^2}{D}, \quad (70)$$

где m — масса частицы;

v — линейная (окружная) скорость вращения барабана;

D — диаметр барабана.

5. Сила тяжести частицы G , величина нормальной и тангенциальной составляющих которой зависит от положения частицы на барабане

$$G = mg, \quad (71)$$

где g — ускорение свободного падения.

Таким образом, результирующая сила, прижимающая частицу к поверхности барабана, будет равна

$$F_{\text{рез}} = F + F_s - F_n - F_n \pm G. \quad (72)$$

В зависимости от положения частицы на поверхности барабана величина этих сил неодинакова. При выходе частицы из зоны действия коронного разряда действие сил F и F_s прекращается и удерживающая сила определяется результирующей оставшихся сил. Кроме того, при удалении частицы от зоны коронного разряда ослабевает действие силы зеркального отображения, так как частица постепенно разряжается.

Неодинаково действие и силы тяжести: в верхней части барабана она прижимает частицу к поверхности, а в нижней, наоборот, отрывает.

Величиной пондеромоторной силы в расчетах можно пренебречь. Если пренебречь также весьма малой в зоне действия коронного разряда силой тяжести G (по сравнению с F и F_3), то результирующая сила, прижимающая частицу к поверхности барабана, будет равна

$$F_{\text{рез}} = F + F_3 - F_{\text{ц}}. \quad (73)$$

Подставляя в формулу (73) значения сил, будем иметь

$$F_{\text{рез}} = \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) E^2 a^2 \mu(R) + \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right)^2 E^2 a^2 \mu^2(R) - \frac{2m v^2}{D}. \quad (74)$$

Преобразуя полученную формулу и подставляя значения $v = \frac{\pi D n}{60}$ и $m = \frac{4}{3} \pi a^3 \delta$, где δ — плотность частицы; D и n — диаметр и скорость вращения осадительного электрода, получаем

$$F_{\text{рез}} = \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) E^2 a^2 \mu(R) \left[1 + \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) \mu(R)\right] - 7,4 \cdot 10^{-4} \pi^3 a^3 \delta D n^2. \quad (75)$$

При $F_{\text{рез}} > 0$ частица будет удерживаться на поверхности барабана. Решая уравнение (75) относительно a при $F_{\text{рез}} = 0$, можно определить максимальный размер частиц, удерживаемых на барабане в зоне действия короны

$$a_{\text{max}} = \frac{\left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) E^2 \mu(R) \left[1 + \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) \mu(R)\right]}{7,4 \cdot 10^{-4} \pi^3 \delta D n^2}. \quad (76)$$

Результирующая сила, удерживающая частицу после выхода ее из зоны действия коронного разряда, равна

$$F_{\text{рез}} = F_3 - F_{\text{ц}} - G_n. \quad (77)$$

Разряд частицы на заземленную поверхность осадительного электрода выражается уравнением

$$Q_R = Q_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (78)$$

где Q_R — заряд частицы по истечении t (с) после соприкосновения ее с осадительным электродом;

Q_0 — первоначальный заряд частицы;

e — основание натуральных логарифмов;

R — контактное сопротивление между частицей и электродом;

C — емкость между частицей и электродом.

Подставляя значение Q_R в уравнение (68), получим

$$F_3 = \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right)^2 E^2 a^2 \mu^2(R) e^{-\frac{2t}{RC}}. \quad (79)$$

Учитывая, что нормальная слагающая силы тяжести G_n изменяется в пределах от $G_n = 0$ (верхняя точка барабана) до

$$G_n = \frac{4}{3} \pi a^3 \delta g = 1,3 \cdot 10^3 \pi a^3 \delta \quad (80)$$

(нижняя точка барабана), можно аналогично предыдущим рассуждениям определить максимальный размер частиц, удерживаемых на барабане вне зоны действия коронного разряда

$$a_{\text{max}}^* = \frac{\left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) E^2 \mu^2(R) e^{-\frac{2t}{RC}}}{7,4 \cdot 10^{-4} \pi^3 \delta D n^2 + 1,3 \cdot 10^3 \pi \delta}. \quad (81)$$

Уравнения (76) и (81) пригодны лишь для качественной оценки процесса сепарации, так как расчеты по ним для обычных условий дают чрезмерно завышенные размеры частиц.

До сих пор мы рассматривали процесс разделения частиц по электропроводности без учета влияния на поведение частиц отклоняющего электрода I (см. рис. 40). Наличие в рабочей зоне сепаратора отклоняющего электрода, имеющего одинаковый с коронирующим электродом потенциал, приводит к созданию параллельно с полем коронного разряда электростатического поля высокой напряженности. Именно поэтому такие сепараторы и названы коронно-электростатическими.

Роль отклоняющего электрода сводится к следующему. Поскольку частицы, переносимые вращающимся барабаном в зону действия электростатического поля, имеют одноименный по знаку с отклоняющим электродом остаточный заряд, они сильнее прижимаются электрическими силами этого поля к поверхности барабана. Причем электростатическое поле способствует стеканию заряда частиц на заземленный осадительный электрод. Действие электростатического поля как своеобразного ускорителя разрядки частиц зависит от их электропроводности. Если частица обладает достаточно хорошей электропроводностью, то электрическая сила статического поля будет способствовать увеличению скорости стекания остаточного заряда и более быстрому отрыву частицы от поверхности осадительного электрода. В случае плохой электропроводности частицы стекание остаточного заряда с нее будет проходить очень медленно и электрическое поле будет прижимать частицу к осадительному электроду. Таким образом, содействуя разделению проводящих и непроводящих частиц, электростатическое поле является важным фактором интенсификации процесса электрической сепарации в барабанных коронно-электростатических сепараторах.

Режим извлечения. В этом режиме работает большая группа камерных коронных сепараторов, схема рабочей зоны которых и принцип разделения частиц в ней показаны на рис. 41. В камерных сепараторах электрическое поле коронного разряда возникает между коронирующим электродом 1, представляющим собой закрепленный на изоляторах каркас с натянутыми тонкими проволоками, и заземленным электродом 3. Исходный материал из бункера 2 подается в межэлектродное пространство, где частицы заряжаются и движутся по траекториям,

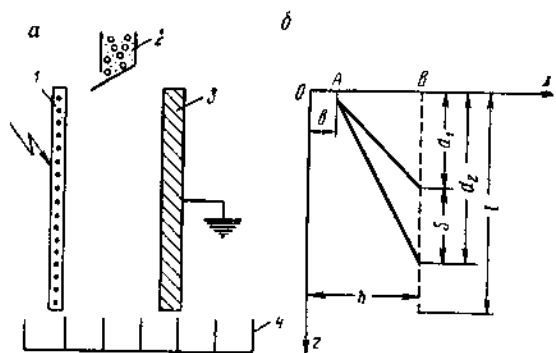


Рис. 41. Принципиальная схема камерного коронного сепаратора: а — схема устройства; б — схема разделения частиц минералов

определяемым соотношением действующих на них электрических и механических сил. В зависимости от диэлектрической проницаемости, плотности и размеров частицы попадают в соответствующие приемники 4.

На частицу, падающую в поле коронного разряда камерного сепаратора, действуют следующие силы:

1. Сила взаимодействия электрического поля коронного разряда с зарядом частицы, перемещающая частицу в направлении заземленного электрода и определяемая по формуле (67).

2. Пондеромоторная сила, возникающая в неоднородном электрическом поле и действующая на поляризованную частицу в направлении коронирующего электрода [см. формулу (69)].

3. Сила тяжести частицы.

На рис. 41, б показаны траектории падающих частиц с различными плотностями, размерами и диэлектрическими постоянными. За ось z принято направление плоскости, в которой расположены коронирующие провода, а за ось x — направление, перпендикулярное к этой плоскости. На рисунке буквами обозначены: O — коронирующий электрод, B — заземленный электрод, h — расстояние между электродами, l — высота рабо-

чей зоны сепаратора, A — место загрузки исходного материала в межэлектродное пространство, d_1 и d_2 — расстояния от места загрузки до точек соприкосновения частиц с заземленным электродом, $S = d_2 - d_1$ — расстояние между точками соприкосновения частиц.

Если приближенно принять траекторию движения частицы за прямую линию, то наклон ее к оси x будет определяться угловым коэффициентом [9]

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x}{z} = \frac{3}{8} \frac{\epsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) E^2}{4,9 \pi a b} \quad (82)$$

Из формулы (82), вывод которой приведен в указанной литературе, видно, что при всех прочих равных условиях частицы более мелкие будут соприкасаться с заземленным электродом (или выходить за пределы межэлектродного пространства) вверху, а более крупные — внизу.

Пример. Определить координату z соприкосновения частицы с заземленным электродом, если дано: диаметр частицы $a = 0,0001$ м, плотность $\delta = 2600$ кг/м³, напряженность электрического поля коронного разряда $E = 6 \cdot 10^6$ В/м, диэлектрическая проницаемость частицы $\epsilon \rightarrow \infty$, расстояние между электродами $x = h - b = 0,09$ м.

Подставляя значение величин в формулу (82), получим:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x}{z} = \frac{3}{8} \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3 (6 \cdot 10^6)^2}{4,9 \cdot 3,14 \cdot 0,0001 \cdot 2600} \approx 0,9.$$

Тогда

$$z = x \operatorname{tg} \alpha = 0,09 \cdot 0,9 = 0,081 \text{ м.}$$

Физические свойства частиц (диэлектрическая проницаемость, плотность и радиус), входящие в формулу (82), называют фактором сепарации f_c

$$f_c = \frac{1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}}{a b} \quad (83)$$

Чем больше разница в значениях факторов сепарации, тем легче происходит разделение минералов.

Расстояние точки соприкосновения частицы с заземленным электродом можно найти по формуле [9]

$$d = \frac{8 \cdot 4,9 \pi (h - b)}{3 E^2 f_c} \quad (84)$$

Для характеристики эффективности разделения частиц служит величина $S = d_2 - d_1$, показывающая, на каком расстоянии друг от друга соприкасаются с заземленным электродом отдельные частицы. С учетом формулы (84) находим

$$S = d_2 - d_1 = \frac{8 \cdot 4,9 \pi (h - b)}{3 E^2} \left(\frac{1}{f_c} - \frac{1}{f_c} \right) \quad (85)$$

Пример. Определять угол между траекториями падения сферических частиц магнетита и кварца в камерном сепараторе, если дано: диаметр частиц $a = 5 \cdot 10^{-4}$ м, плотность кварца и магнетита соответственно 2500 и 5000 кг/м³, напряженность поля коронного разряда $E = 6 \cdot 10^6$ В/м, диэлектрическая проницаемость кварца $\epsilon = 5$, магнетита $\epsilon = \infty$.

Если принять, что в зоне разделения частиц электрическое поле близко к однородному, то на заряженную частицу будут действовать две силы: электрическая сила $F = QE$ и сила тяжести $G = mg$ (силой сопротивления среды, в данном случае воздуха, пренебрегаем). Они и определяют угол наклона траектории частицы к оси z

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F}{G} = \frac{Q_{\max} E}{mg} = \frac{Q_{\max} E}{\frac{4}{3} \pi a^3 \delta g}, \quad (86)$$

где Q_{\max} — максимальный заряд частицы, Кл;

m — масса частицы, кг;

δ — плотность частицы, кг/м³.

Определим максимальные заряды частиц кварца и магнетита по формуле (56):

для кварца

$$Q'_{\max} = 4 \pi a^2 \epsilon E \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) = 4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (5 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 6 \cdot 10^6 \times \\ \times \left(1 + 2 \frac{5 - 1}{5 + 2}\right) \approx 3,6 \cdot 10^{-11} \text{ Кл,}$$

для магнетита

$$Q''_{\max} = 4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (5 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 6 \cdot 10^6 (1 + 2) = 5 \cdot 10^{-11} \text{ Кл.}$$

Таким образом, максимальный заряд, который получает в поле короны магнетит ($\epsilon = \infty$), незначительно отличается от заряда кварца (непроводник). Угол наклона траектории движения частицы кварца к оси z

$$\alpha_1 = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{Q'_{\max} E}{\frac{4}{3} \pi a^3 \delta g} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{3,6 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^6}{\frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot 12,5 \cdot 10^{-11} \cdot 2,5 \cdot 10^3 \cdot 9,8} = \\ = \operatorname{arc} \operatorname{tg} 3,0 = 71^\circ 30'.$$

То же, для частиц магнетита

$$\alpha_2 = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{5 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^6}{\frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot 12,5 \cdot 10^{-11} \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 9,8} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} 2,08 = 64^\circ 20'.$$

Угол, под которым расходятся траектории частиц кварца и магнетита в коронном поле камерного сепаратора, составляет

$$\alpha_1 - \alpha_2 = 71^\circ 30' - 64^\circ 20' = 7^\circ 10',$$

причем траектория кварцевой частицы проходит выше траектории магнетита (в верхней части веера).

Из примера видно, что разделение частиц в коронном поле камерного сепаратора в значительной мере определяется размерами частиц. Из формулы (56) следует, что при изменении

диэлектрической проницаемости частицы ϵ от 1 до ∞ заряд ее изменяется лишь в 3 раза, в то время как этот же заряд прямо пропорционален квадрату диаметра частицы. Таким образом, разделение частиц по разнице в их диэлектрических проницаемостях возможно только при очень узкой классификации материала по крупности. С другой стороны, видно, что электропроводность частиц кварца и магнетита в данном примере не оказывает большого влияния на их разделение, так как магнетит в этом случае ведет себя как частица с очень большой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon \rightarrow \infty$).

Следует отметить, что при рассмотрении динамики заряженных частиц при свободном их падении в электростатическом поле нами не учитывались силы сопротивления среды, направленные противоположно движению зерна. Виды сопротивления среды и их влияние на процесс разделения частиц описаны в литературе [9, 11].

§ 24. Методы и область применения электрической сепарации

В настоящее время при обогащении рудных и нерудных полезных ископаемых наибольшее распространение получили следующие методы электрической сепарации:

1. Электростатическая сепарация, осуществляемая в электростатическом поле (частицы заряжаются любым способом или их комбинациями; см. § 22).

2. Коронная сепарация, осуществляемая в электрическом поле коронного разряда (частицы заряжаются ионизацией).

3. Коронно-электростатическая сепарация, осуществляемая в комбинированном коронно-электростатическом поле (частицы заряжаются ионизацией).

Реже применяются диэлектрическая сепарация, при которой незаряженные частицы разделяются в электростатическом поле под действием пондеромоторных сил, и трибоадгезионная сепарация частиц за счет трибоэлектрического эффекта, адгезии.

Сепарация в электростатическом поле применяется главным образом для разделения минералов, у которых преобладают свойства непроводников (например, кальцит, кварц, гранат, алмаз и др.). При сепарации в электростатическом поле используется различие минеральных частиц в электропроводности (вольфрамитовые, касситеритовые, фосфоритовые руды), электризации трением (кальцит, мрамор, кварц, дистен, силлиманит, полевой шпат), диэлектрической проницаемости (пирохлор, циркон, танталит, кварц). Пиро- и пьезозаряды частиц в качестве главных параметров их разделения в электростатическом поле практически почти не используются.

Обогащение в электростатическом поле, основанное на использовании различия в электропроводности частиц при зарядке

их контактом с заряженным электродом, применяется при большой разнице в электропроводности частиц (на несколько порядков) и при предварительной классификации мелких фракций руды (0,2—1,5 мм) на узкие классы по крупности. Эффективно обогащаются этим методом вольфрамитовые, касситеритовые, хромитовые и вермикулитовые руды. Например, из исходной касситеритовой руды крупностью 0,1—1,2 мм, содержащей 16,3% касситерита, после предварительной классификации на классы 0,1—0,5 и 0,5—1,2 мм и отдельной сепарации каждого класса получен концентрат с содержанием 72,7% полезного минерала при извлечении 97%; из вольфрамитовой руды крупностью 0,1—1,2 мм, содержащей 1,2% вольфрамита, получен концентрат с содержанием 33,5% полезного минерала при извлечении 96,3%. Обогащение этим же методом фосфоритовых руд крупностью 0,1—1,6 мм позволяет снизить содержание пустой породы с 10,8% в исходной руде до 3,3% в концентрате при извлечении фосфорита 93,2% [9].

Широкое промышленное применение для обогащения химического сырья, дистен-силлиманитовых продуктов и других руд нашел метод сепарации в электростатическом поле, основанный на использовании различий минералов в электризации трением — трибоэлектростатическая сепарация. Применяя этот метод для разделения дистен-силлиманит-кварцевого продукта крупностью 0,1—0,3 мм, содержащего 60—70% дистен-силлиманита, 15—20% кварца и прочие минералы (циркон, рутил, ставролит, турмалин), получают концентрат с содержанием 95% дистен-силлиманита при его извлечении более 80%. Трибоэлектростатическая сепарация применяется также при обогащении полевошпат-кварцевого сырья, фосфоритовых, серных и других руд.

Сепарация в электрическом поле коронного разряда применяется для разделения минералов, у которых преобладают свойства проводников. Коронная сепарация используется для выделения в проводящую фракцию пирита, халькопирита, галенита, пирротина, пентландита, золота, серебра и других минералов.

Наибольшая величина разделяющих сил, а поэтому и наибольшая производительность сепараторов достигается при коронно-электростатическом методе. Этим методом в проводящую фракцию выделяются ильменит, рутил, лейкоксен, касситерит, гематит, магнетит, хромит, галенит, пирит, халькопирит и другие минералы.

Например, при доводке титан-циркониевого концентрата в промышленных условиях устойчиво получают извлечение минералов рутила и циркона не ниже 95% при содержании их в концентратах 98—99%. Доводка касситерит-вольфрамитового концентрата коронно-электростатическим способом позволяет повысить содержание WO_3 от 39,6 до 74% в вольфрамитовом

концентрате и содержание олова от 23,7 до 74% в оловянном концентрате при высоком извлечении вольфрамита и касситерита в соответствующие концентраты. Наличие объемных зарядов в коронно-электростатическом поле позволяет разделять в нем минералы, не разделяемые в электростатическом. Например, шеелит в электростатическом поле не отделяется от ряда минералов, легко отделяемых от него с помощью поля коронного разряда.

Коронно-электростатический метод применяется не только для обогащения, но и для классификации, поскольку величина разделяющих сил зависит также и от крупности минеральных частиц.

При коронно-электростатическом методе на процесс разделения оказывает влияние не только электропроводность, но и диэлектрическая проницаемость частиц. По этой причине наблюдаются случаи, когда в проводниковую фракцию выделяются минералы с меньшей электропроводностью (пирохлор, касситерит), а минералы с большей электропроводностью (сидерит) могут выделяться в непроводниковую фракцию.

Трибоадгезионный метод с применением пироэлектрического эффекта нашел промышленное применение при разделении асбестовых руд, смеси кварца и полевых шпатов и для классификации и обогащения ряда тонкоизмельченных материалов. В табл. 10 [9] приведены результаты опытов трибоадгезионной сепарации различных тонкоизмельченных материалов, показывающие перспективы ее применения для самых разнообразных материалов. На некоторых фабриках (Лурги, ФРГ) обогащается нагретая смесь кварца и полевых шпатов путем подачи ее на охлаждаемый металлический ролик, находящийся под высоким напряжением. За счет контакта материала с холодным роликом возникает поляризация чистого кварца, притягивающегося к валку, в то время как полевой шпат отскакивает от валка.

Таблица 10
Результаты электросепарации кварц-полевошпатовых смесей

Сепарируемый материал	Продукт	Содержание, %	
		полевого шпата	кварца
Квари-микроклин	Кварцевый	5,0	95,0
	Полевошпатовый	93,0	7,0
	Исходный	40,4	59,6
Квари-альбит	Кварцевый	4,0	96,0
	Полевошпатовый	79,0	21,0
	Исходный	32,7	67,3

Прод. табл. 10

Сепарируемый материал	Продукт	Содержание, %	
		полевого шпата	кварца
Кварц-олигоклаз	Кварцевый	1,0	99,0
	Полевошпатовый	71,0	29,0
	Исходный	33,6	66,4
Кварц-лабрадорит	Кварцевый	6,0	94,0
	Полевошпатовый	91,0	9,0
	Исходный	41,0	59,0
Кварц + равные количества микроклина, альбита, олигоклаза и лабрадорита	Кварцевый	2,0	98,0
	Полевошпатовый	89,0	11,0
	Исходный	30,1	69,9

Диэлектрическая сепарация в жидких диэлектриках применяется только в лабораторных условиях для разделения порошковатых материалов, классифицированных на узкие классы крупности. Промышленное использование этого метода сдерживается из-за отсутствия безвредных и дешевых диэлектрических жидкостей, а также сложностью их регенерации.

Глава VII

Электрические сепараторы

§ 25. Классификация электрических сепараторов

Широкое внедрение электрических методов в практику обогащения различных полезных ископаемых потребовало создания конструкций электрических сепараторов, наиболее полно учитывающих свойства обогащаемого сырья, обеспечивающих получение высоких технологических показателей при большой производительности. В настоящее время в промышленности и для проведения технологических исследований применяются многочисленные конструкции сепараторов, отличающиеся способами зарядки минералов, действующими на них электрическими и механическими силами, рабочей средой в камере сепаратора, методом сепарации и другими признаками.

Для рассмотрения конструкций сепараторов воспользуемся их классификацией, в основу которой положен метод электрической сепарации (см. § 24). В соответствии с этой классификацией электрические сепараторы можно разделить на следующие основные группы:

1) электростатические (барабанные, камерные, каскадные, пластинчатые);

2) коронные и коронно-электростатические (барабанные, камерные);
3) трибоадгезионные;
4) диэлектрические.

Основными элементами конструкции любого электрического сепаратора являются зарядное устройство, в котором осуществляется зарядка частиц, и зона сепарации, в которой происходит разделение частиц. Зарядное устройство и зона сепарации могут быть выполнены отдельно или конструктивно объединены. Неотъемлемой частью электрического сепаратора является источник высокого напряжения.

§ 26. Электростатические сепараторы

Сущность электростатического метода сепарации минеральных частиц заключается во взаимодействии электростатического поля с зарядом частиц, приобретаемым ими при контакте с

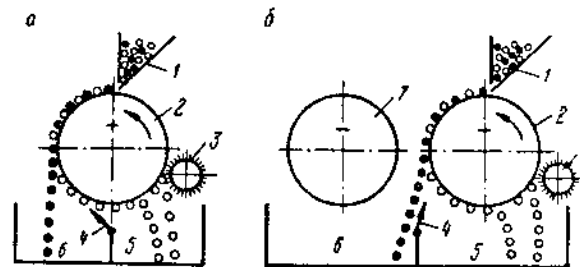


Рис. 42. Принципиальные схемы барабанных электростатических сепараторов: а — однобарабанного; б — двухбарабанного

заряженным телом, электризацией трением или другими способами. В результате такого взаимодействия изменяются траектории движения частиц и происходит их разделение.

На рис. 42 показаны схемы одно- и двухбарабанных электростатических сепараторов, осуществляющих разделение минеральных частиц по разнице в их электропроводности. Процесс разделения в них частиц происходит следующим образом.

Исходный материал из бункера 1 подается на заряженный вращающийся барабан 2, на котором электропроводные частицы быстро заряжаются и в результате взаимодействия одноименных зарядов отталкиваются от барабана. Неэлектропроводные частицы, заряжаясь медленно, падают без отклонения или удерживаются на барабане и снимаются щеткой 3.

При помощи делительной перегородки 4 регулируется количество и качество электропроводной и неэлектропроводной фракций, попадающих соответственно в бункеры б и 5.

У двухбарабанного сепаратора (рис. 42, б) противопоставленный прищипывающему барабану электрод 7 противоположной полярности увеличивает отклонение электропроводных частиц и этим улучшает их отделение от менее электропроводных. Процесс сепарации осуществляется более успешно, если частицы дополнительно подзарядить, например, при помощи ионизации.

Для разделения минеральных смесей по электропроводности применяется пластинчатый каскадный сепаратор ВУГИ-1 [9], состоящий из шестнадцати пар параллельных пластинчатых электродов. Нижние электроды 1 гладкие, верхние 2 жалюзиеобразные. Один ряд пластинчатых электродов заземлен, а на другой ряд, закрепленный на изоляторах 3, подается высокое напряжение (рис. 43).

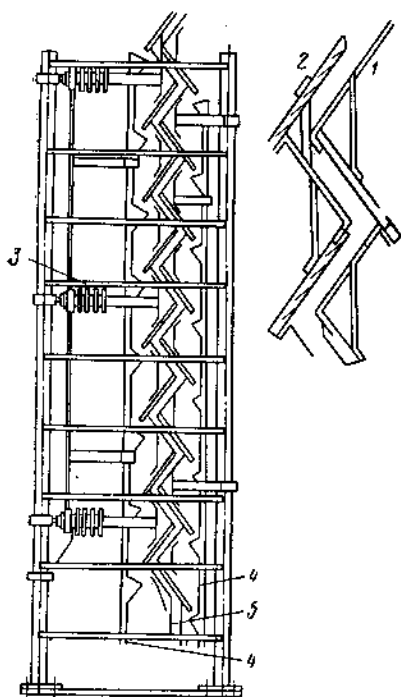


Рис. 43. Схема пластинчатого электростатического сепаратора ВУГИ-1

Исходный материал, перемещаясь сверху вниз между электродами, подвергается последовательно воздействию шестнадцати электрических полей. Проводящие частицы отрываются от гладкого электрода и, проходя через жалюзи противоположного электрода, выводятся в приемники 4. Непроводящие частицы, пройдя все каскады сепаратора, попадают в приемник 5. Процесс сепарации регулируется углом наклона пластин, расстоянием между ними и величиной подаваемого напряжения. Изменяя угол наклона пластин, можно увеличить или уменьшить скорость перемещения по ним частиц (время соприкосновения с электродом), а также величины их зарядов. Расстояние между электродами обычно устанавливается в пределах 40—60 мм. При рабочем напряжении около 70 кВ градиент напряженности электростатического поля в межэлектродном пространстве сепаратора составляет 4—7 кВ/см ($4 \cdot 10^5$ — $7 \cdot 10^5$ В/м).

При перемещении по гладкому электроду частицы приобретают заряды трения, которые оказывают некоторое влияние на процесс разделения в этих сепараторах.

На рис. 44 показаны схемы промышленных каскадных электростатических сепараторов, использующих явление «обратимости» минералов, т. е. осуществляющих разделение минералов в зависимости от знака их заряда трения.

Смесь минеральных частиц, обладающих различными по знаку зарядами трения, поступает в межэлектродное пространство, образуемое вращающимся заземленным барабаном 1

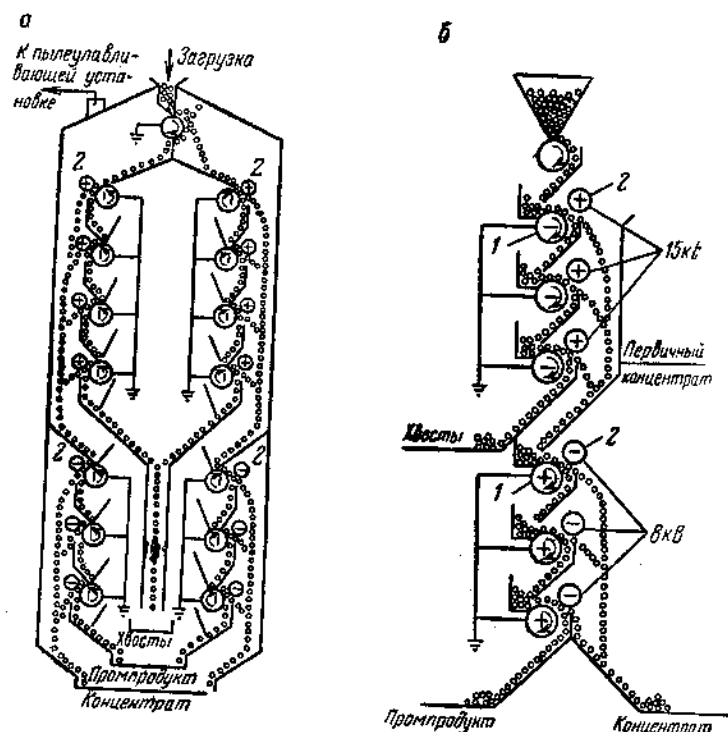


Рис. 44. Схемы каскадных электростатических сепараторов: а — двухрядного; б — однорядного

и электродом 2, находящимся под высоким потенциалом. Электроды трех верхних каскадов (рис. 44, б) имеют положительный, а трех нижних каскадов — отрицательный высоковольтный потенциал. Частицы, обладающие зарядом трения, обратным по знаку заряду электродов 2, отклоняются в их сторону и попадают на нижние три каскада, где осуществляется их очистка, а частицы, имеющие заряд трения, обратный по знаку заряду заземленного барабана, притягиваются к нему и выносятся на нижележащий барабан (последовательность обработки продуктов хорошо видна на рис. 44).

Для обогащения полезных ископаемых, представляющих собой смесь минералов-диэлектриков и полупроводников (фосфоритовые, серные и другие руды), применяются трибоэлектростатические камерные сепараторы. Разделение минеральных частиц в этих сепараторах осуществляется с использованием

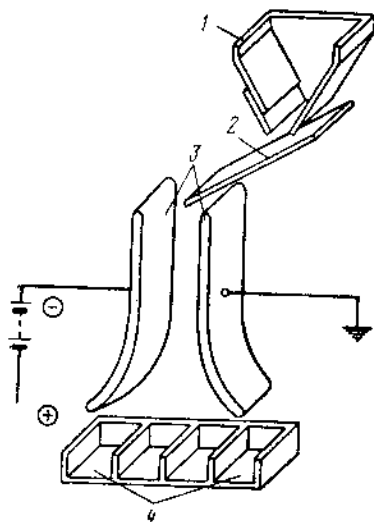


Рис. 45. Схема лабораторного электростатического сепаратора ГИГХС-2

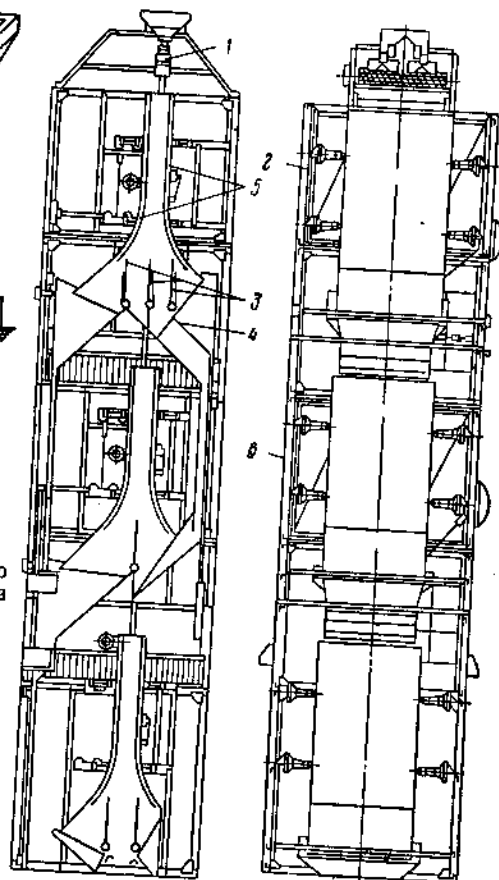


Рис. 46. Схема промышленного трибоэлектрического камерного сепаратора

разницы в их зарядах, получаемых в результате предварительной электризации трением. На рис. 45 показана схема лабораторного электростатического камерного сепаратора ГИГХС-2 [11]. Сепаратор состоит из загрузочной воронки 1, лотка 2, двух пластинчатых электродов 3 и приемников 4.

Минеральные частицы, перемещаясь по лотку 2, приобретают определенные заряды трения и, попадая затем в электростатическое поле, создаваемое между электродами, отклоняются в соответствующие стороны в зависимости от величины и знака заряда. Перегородки приемного устройства рассекают

выходящий из межэлектродного пространства веер частиц, распределяя их по отсекам.

На рис. 46 показана схема промышленного трибоэлектрического камерного сепаратора. Сепаратор состоит из трех секций, расположенных одна над другой. Каждая секция включает в себя электроды 5, выполненные в виде параллельных металлических пластин с отогнутыми вниз концами, делительные перегородки 3 и приемные точки 4. Электроды, к которым подводится высокое напряжение, смонтированы на изоляторах 2, а заземленные электроды крепятся непосредственно к каркасу 6. В верхней части сепаратора установлен питатель 1. Конструкция сепаратора позволяет изменять межэлектродное расстояние, смещать электроды в вертикальном направлении и отклонять их на некоторый угол относительно вертикальной оси сепаратора. Электростатическое однородное поле между электродами создается выпрямленным высоким напряжением около 70—100 кВ. Градиент поля регулируется изменением величины подводимого напряжения, а также расстоянием между электродами.

Предварительно наэлектризованный за счет трения материал поступает в межэлектродное пространство первой секции, где при свободном падении происходит разделение частиц в зависимости от величины и знака их зарядов трения. Продукты сепарации из первой секции при помощи делительных перегородок и систем приемных течек направляются в бункера концентрата и хвостов и на повторные операции. Конструкция сепаратора позволяет производить перемешивание любого из продуктов первой секции. Промпродукт третьей секции, смешиваясь с исходным материалом, снова возвращается в первую секцию. Описание других типов подобных сепараторов приведено в литературе [9, 11].

Для сепарации минералов-диэлектриков институтом «Гипромашобогашение» разработан и изготовлен на заводе трибоэлектрический сепаратор СТЭ (рис. 47). Сепаратор состоит из питателя 1 самотечного типа и трех секций сепарации. Каждая секция сепарации снабжена системой подготовительных плоскостей 2 для сообщения частицам материала трибозарядов, статическими электродами 4 и 5 и отсекателем 6, направляющим продукты сепарации в соответствующие точки 7. Электрод 4 заземлен, а электрод 5 подвешен на изоляторе 3 и подключен к высоковольтному источнику тока. Сепаратор снабжен шкафом 8 с электрооборудованием и выпрямительными установками.

Обрабатываемый материал загружается в приемный бункер, расположенный над питателем. Из бункера он поступает в точку питателя, где разделяется на два потока, а затем направляется на подготовительную плоскость. Перемещаясь самотеком, различные минералы смеси благодаря трению о поверхность

плоскости и друг о друга приобретают различные по величине и знаку заряды. Заряженный материал поступает в электростатическое поле, создаваемое заряженными электродами. При свободном падении в межэлектродном пространстве траектория движения частиц изменяется в зависимости от величины и знака остаточного заряда, величины напряжения на заряженном электроде, градиента напряженности поля, а также плотности и круп-

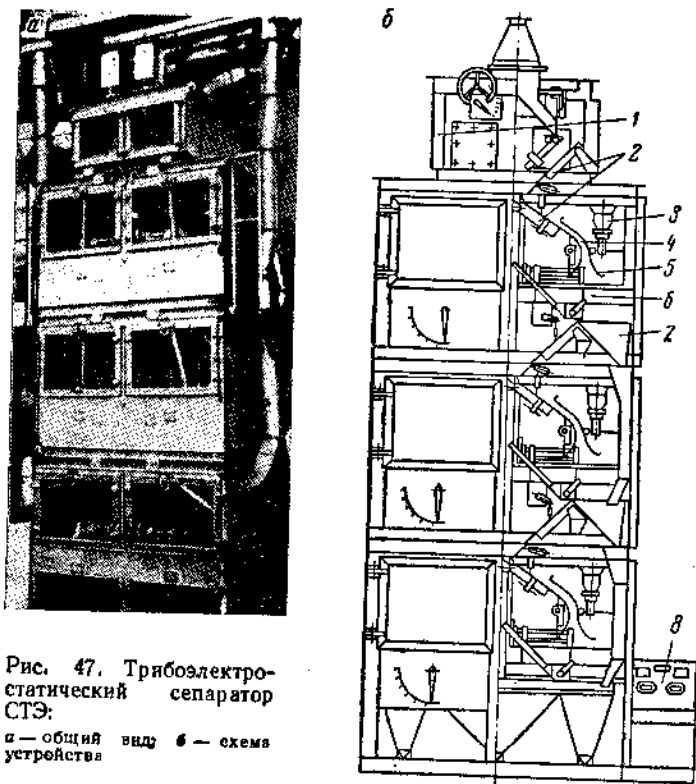


Рис. 47. Трибоэлектростатический сепаратор СТЭ:
а — общий вид б — схема устройства

ности частиц. Отклоненная фракция попадает в соответствующие приемники и выводится из сепаратора, а остальной материал направляется в следующую секцию, где весь цикл повторяется.

Производительность сепаратора 6 т/ч. Крупность обрабатываемого материала 0,3—0,074 мм. Подаваемое на электроды напряжение до 20 кВ, напряженность электростатического поля 3,4—4 кВ/см. Габаритные размеры сепаратора, мм: длина 2890, ширина 2120, высота 4611. Рабочая длина электродов 2000 мм.

§ 27. Коронные и коронно-электростатические сепараторы

Широкое распространение в практике обогащения полезных ископаемых получили барабанные электрические сепараторы, в которых используются одновременно поле коронного разряда и электростатическое поле (см. § 23). Такие сепараторы называются коронно-электростатическими. Реже применяются сепараторы, разделение минеральных частиц в которых осуществляется в поле чисто коронного разряда.

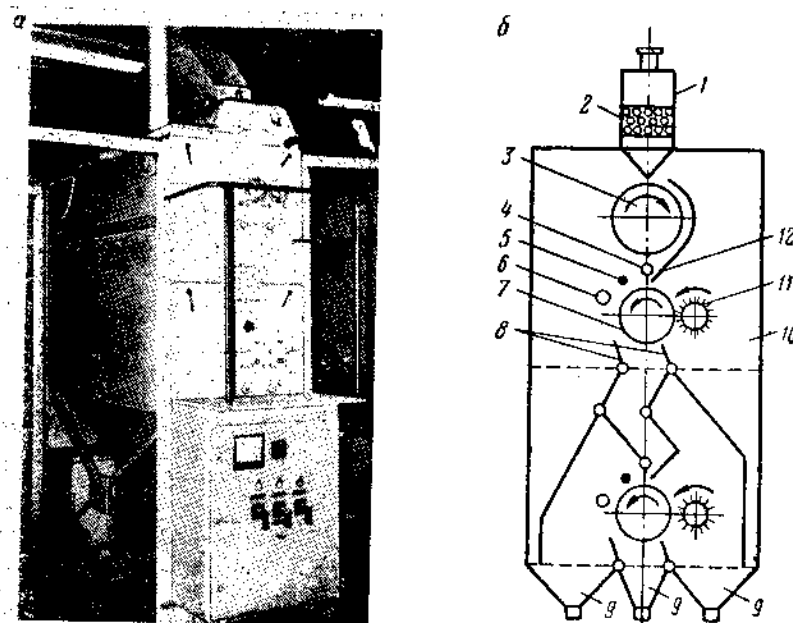


Рис. 48. Барабанный коронно-электростатический сепаратор ЭКС-1250:
а — общий вид; б — схема устройства

К барабанным коронно-электростатическим сепараторам относятся: ЭКС-1250, ЭКС-3000, СЭС-2000, СЭС-1000.

На рис. 48 показан барабанный коронно-электростатический сепаратор ЭКС-1250. Сепаратор состоит из загрузочного бункера 1 с электрическим подогревателем 2, питателя 3 и двух одинаковых каскадов сепарации. Каждый каскад включает коронирующий электрод 5, отклоняющий электрод 6, осадительный электрод 7, экранирующую шторку 4, щетку 11, питающий лоток 12 и отсекатели 8. Корпус 10 сепаратора представляет собой металлическую раму с обшивкой из листового железа. В нижней части корпуса расположены приемники 9 для продуктов разделения.

Верхний каскад предназначен для основной операции разделения, нижний — для перечистных операций. Если двух операций разделения недостаточно для получения продуктов необходимого качества, то полученные продукты подвергаются повторному разделению в том же сепараторе или поступают в следующий сепаратор.

Осадительный электрод представляет собой вращающийся в подшипниках барабан диаметром 130 мм, рабочая поверхность которого подвергается хромированию и тщательно полируется. Параллельно образующей осадительного электрода в специальных держателях устанавливаются коронирующий и отклоняющий электроды. Держатели крепятся к высоковольтным изоляторам. Конструкция электроддержателей позволяет менять положение коронирующего и отклоняющего электродов относительно осадительного и друг друга.

Коронирующий электрод представляет собой нихромовую проволоку диаметром 0,3—0,4 мм, туго натянутую между держателями; отклоняющий электрод — тонкую (10—12 мм) металлическую трубку, заключенную в чехол из диэлектрика (керамический или эбонитовый). В качестве коронирующего применяется также игольчатый электрод, изготовляемый из игл, направленных остриями в сторону осадительного электрода. Опыт показывает, что игольчатый электрод позволяет интенсифицировать процесс зарядки частиц и получать более высокие технологические показатели сепарации.

Очистка поверхности осадительного электрода от налипших на него частиц производится вращающейся щеткой. Щетка имеет сменные лопасти из термостойкой резины и вращается в том же направлении, что и осадительный электрод. Экранирующая шторка обеспечивает спокойное поступление материала на осадительный электрод.

Работа сепаратора осуществляется следующим образом. Исходный материал, пройдя электрический подогреватель, при помощи барабанного питателя подается тонким слоем на осадительный электрод верхнего каскада сепаратора. Вращающийся осадительный электрод транспортирует материал в зону действия электрического поля коронного разряда, где каждая частица смеси приобретает заряд, знак которого соответствует знаку короны. Так как частицы во время зарядки находятся в контакте с поверхностью заземленного осадительного электрода, то одновременно с зарядкой частиц происходит их разрядка. Частицы, обладающие высокой электропроводностью (проводники), выйдя из зоны действия коронного разряда, быстро отдадут свой остаточный заряд осадительному электроду и центробежными силами сбрасываются с барабана. Частицы с меньшей электропроводностью отдадут свой заряд осадительному электроду медленнее и отрываются от него позже проводников. Непроводящие частицы, которые не успевают

разрядиться за один оборот осадительного электрода, счищаются с него щеткой.

Таким образом, частицы в зависимости от скорости передачи своего заряда осадительному электроду, определяемой их электропроводностью, имеют различные координаты точек отрыва от поверхности барабана. Влияние отклоняющего электрода на процесс сепарации см. в § 23. Образующийся

вещер частиц разделяется при помощи отсекающей на три продукта: проводящая фракция, непроводящая фракция и промпродукт. Проводящая и непроводящая фракции выводятся из сепаратора, а промпродукт направляется на нижний каскад, где осуществляется его перечистка. Проводящая и непроводящая фракции каскада присоединяются к соответствующим продуктам верхнего каскада, а промпродукт выводится из сепаратора. Величина загрузки нижнего каскада регулируется отсекающими. При помощи отсекающих корректируется также качество продуктов сепарации.

На рис. 49 показана схема коронно-электростатического сепаратора ЭКС-3000, который в отличие от сепаратора ЭКС-1250 имеет один каскад.

Для подачи исходного материала в рабочую зону сепаратора служит питающее устройство, состоящее из тетки 2 с регулируемой разгрузочной щелью, барабана 3 и наклонного металлического лотка 4. Барабан питателя приводится во вращение от отдельного электродвигателя 11 через редуктор. Загрузка тетки материалом осуществляется через отверстие 1, к которым подводятся трубы от расположенного над сепаратором бункера. Ширина щели регулируется перемещением по вертикали одной из боковых стенок тетки.

С наклонного лотка материал поступает на вращающийся осадительный электрод 8, представляющий собой пустотелый металлический цилиндр диаметром 160 мм с вваренными в него цапфами. Коронирующий электрод 10 изготавливается из игл, закрепляемых на металлическом стержне цилиндрической или другой формы, не допускающей прогиба и вибрации электрода.

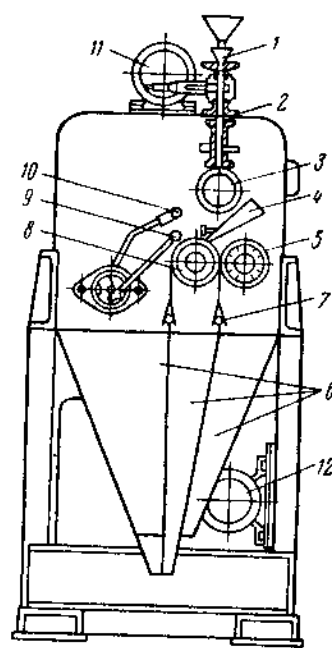


Рис. 49. Схема барабанного коронно-электростатического сепаратора ЭКС-3000

Конструкция отклоняющего электрода 9 аналогична конструкции электрода сепаратора ЭКС-1250. Для очистки поверхности осадительного электрода от непроводящих частиц служит щетка 5. Вращение осадительного электрода и щетки осуществляется от общего электродвигателя 12 через клиноременную передачу.

Корпус сепаратора состоит из жесткой рамы, крышки и боковых стенок, переходящих внизу в приемник 6 для продуктов сепарации. В верхней части приемника установлены отсекатели 7 для разделения веера на три продукта: проводящая фракция, непроводящая фракция и промпродукт.

Высокое напряжение на электроды подается от высоковольтной выпрямительной установки, размещенной внутри корпуса сепаратора.

Принцип работы сепаратора ЭКС-3000 тот же, что и сепаратора ЭКС-1250. В приложении 8 приведена техническая характеристика сепараторов ЭКС-1250 и ЭКС-3000.

Институтом «Гипромашобогашение» разработаны секционные коронно-электростатические сепараторы, которые применяются для доводки редкометалльных и других концентратов. На рис. 50 показан барабанный коронно-электростатический сепаратор СЭС-2000, состоящий из восьми блоков. Каждый блок сепаратора представляет собой самостоятельный рабочий аппарат, включающий питающий бункер 1, коронирующий 2, отклоняющий 3 и осадительный 4 электроды, щетку 5 и отсекающий 6. Загрузка верхних блоков сепаратора осуществляется при помощи барабанно-щелевых питателей. Нижние блоки снабжены приемными бункерами. Блоки изготавливаются в двух исполнениях — с левосторонним и правосторонним расположением межэлектродного пространства относительно осадительного электрода.

Преимуществом секционных сепараторов по сравнению с сепараторами ЭКС-1250 и ЭКС-3000 является возможность компоновки в одном сепараторе различных технологических схем, что позволяет получить в нем готовые продукты обогащения. Например, в сепараторе, показанном на рис. 50, обогащение осуществляется по следующей схеме. В каждом из двух верхних блоков исходный материал разделяется на два продукта, в одном из которых содержатся преимущественно электропроводные, а в другом — неэлектропроводные минералы. Электропроводные продукты обоих верхних блоков объединяются и последовательно дважды перечищаются в двух средних блоках с получением готовой электропроводной фракции и промпродукта. Неэлектропроводные продукты верхних блоков поступают раздельно в боковые блоки, где также подвергаются двукратной очистке с получением готовой неэлектропроводной фракции и промпродукта. Промпродукты возвращаются в этот же сепаратор, либо поступают на доводку в другой сепаратор. Из рис. 50 видно, что

соответствующей перестановкой, а также установкой новых блоков можно в одном сепараторе осуществить любую схему электрического обогащения.

Габаритные размеры сепаратора, мм: длина 3620, ширина — зависит от числа блоков, высота 3930. Длина осадительного электрода 2000 мм, диаметр 150 мм. Производительность на один секционный питатель до 4 т/ч.

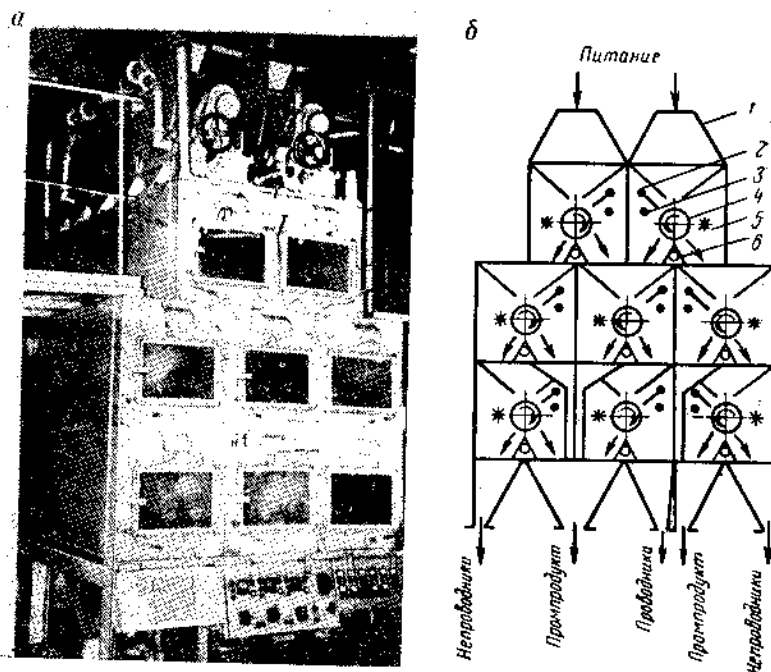


Рис. 50. Барабанный коронно-электростатический сепаратор СЭС-2000: а — общий вид; б — схема устройства

Аналогичен по конструкции и принципу работы сепаратор СЭС-1000, отличающийся от сепаратора СЭС-2000 меньшей длиной рабочей зоны. Если удалить отклоняющие электроды барабанных коронно-электростатических сепараторов, то разделение частиц будет происходить в поле чисто коронного разряда и в этом случае сепараторы следует называть коронными.

Камерные коронные сепараторы. Камерные электросепараторы применяются главным образом для классификации материала по крупности или его обеспыливания. Они могут применяться также и для разделения минеральной смеси по вещественному составу, однако в этом случае минералы, составляющие смесь, должны отличаться по плотности. Разделение частиц в камерных сепараторах происходит при их свободном падении

в межэлектродном пространстве, образованном коронирующим и заземленным электродами. По сравнению с барабанными коронными сепараторами камерные сепараторы конструктивно более просты. В них отсутствуют трущиеся и движущиеся части, что значительно облегчает их эксплуатацию.

На рис. 51 показана схема трехсекционного камерного коронного сепаратора ИГДАН. Сепаратор состоит из загрузочного бункера 1, питателя 2, коронирующих электродов 3, заземленных электродов 4, приемных бункеров для мелких фракций 5 и для крупной фракции 6.

Корпус 7 сепаратора изготавливается из уголкового и листового железа. Питатель шибберный или валковый.

Коронирующий электрод представляет собой металлическую раму (рис. 51, б), на которой горизонтально укреплены тонкостенные трубки диаметром 15—20 мм. Трубки снабжены лезвиями, направленными остриями в сторону заземленных электродов. Коронирующие электроды двухстороннего действия.

Заземленные электроды выполняются комбинированными, состоящими из перфорированного и сплошного электродов. Перфорирован-

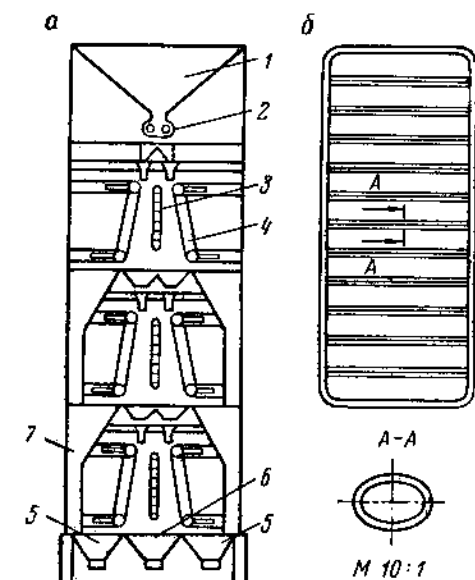


Рис. 51. Принципиальная схема камерного коронного сепаратора ИГДАН: а — схема устройства; б — коронирующий электрод

ный электрод изготавливается из вертикально расположенных стальных пластин, за которыми устанавливается сплошной электрод в виде металлической плоскости.

Установка металлической плоскости за перфорированным электродом исключает нарастание на последнем большого количества пыли, ухудшающей работу сепаратора.

Разделение минеральных частиц в сепараторе осуществляется в режиме отклонения (извлечения). Исходный материал из загрузочного бункера при помощи питателя подается двумя параллельными потоками в межэлектродное пространство. Частицы, падая под действием силы тяжести в поле коронного разряда, приобретают заряды, одинаковые по знаку с потенциалом коронирующего электрода. Заряженные частицы отклоняются в сторону заземленных электродов, при этом крутизна траекто-

рий падения частиц зависит от их плотности, крупности и диэлектрической проницаемости. Частицы более мелкие и легкие сильнее отклоняются в сторону заземленного электрода и, проходя через его перфорированную часть, разгружаются в приемники мелкой фракции. Крупные частицы мало изменяют траекторию свободного падения и попадают в приемник крупной фракции.

При значительной разнице в плотностях минеральных частиц возможно также их разделение по вещественному составу. Габаритные размеры сепаратора, мм: длина 4680, ширина двухрядного сепаратора 2080, высота 4410. Рабочее напряжение до 50 кВ. Производительность (в зависимости от числа и размеров секций) до 50 т/ч.

§ 28. Трибоадгезионные сепараторы

Метод трибоадгезионной сепарации, разработанный И. Н. Плаксиным и Н. Ф. Олофинским, основан на использовании эффекта прилипания тонкодисперсных частиц (менее 0,03 мм) к различным твердым поверхностям за счет молекулярных сил сцепления (адгезии) и электростатических сил. Последние являются следствием наличия у частиц трибозарядов, которые они приобретают в результате трения друг о друга и о детали сепаратора. В качестве механических сил при разделении используются центробежная сила и сила тяжести.

На рис. 52 показана схема трехсекционного трибоадгезионного сепаратора ИГДАН. Сепаратор состоит из загрузочного бункера 1 с направляющим лотком 2, трех барабанов 3, внутри которых вмонтированы электронагревательные элементы 5, щеточных устройств 4, приемника 6 для удерживаемой фракции, приемников 7 и 8 для отрывающейся фракции, отсекателей 9. Все детали сепаратора заземляются.

Исходный материал из бункера по лотку поступает на верхний вращающийся барабан. Тонкодисперсные частицы прилипают к его поверхности и выносятся в приемник для удерживаемой фракции. Более крупные частицы, силы сцепления которых недостаточны для удерживания на поверхности барабана, сбрас-

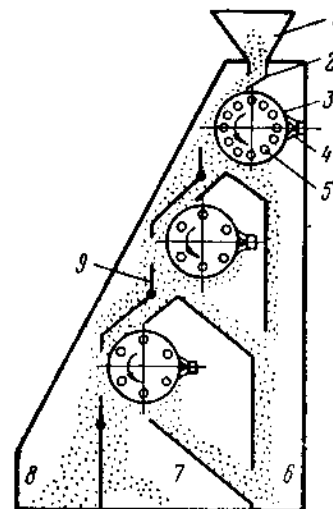


Рис. 52. Принципиальная схема трехсекционного трибоадгезионного сепаратора ИГДАН

сываются центробежной силой в приемник для отрывающейся фракции. Часть промпродукта направляется на нижние барабаны для повторных операций разделения.

На процесс трибоадгезионной сепарации оказывают влияние материал поверхностей барабана и питающих лотков, диаметр и скорость вращения барабана, температура сепарируемого материала и производительность сепаратора.

Благодаря применению метода трибоадгезионной сепарации стало возможным эффективно сепарировать смеси тонкодисперсных частиц, разделение которых другими методами электрической сепарации затруднительно или невозможно. Важно отметить, что при трибоадгезионной сепарации происходит разделение исходного материала не только по крупности, как это имеет место при расसेве на ситах, но и по плотности. Поэтому в продуктах трибосепарации некоторых смесей (например, тонкодисперсных железосодержащих продуктов) можно сконцентрировать полезный компонент и получать высококачественные концентраты.

Методом трибоадгезионной сепарации успешно сепарируются гранулированный ферросилиций, графит, тальк, пылевидный асбест, угольная мелочь, алюминиевые порошки и другие материалы.

§ 29. Диэлектрические сепараторы

Сущность диэлектрической сепарации заключается в действии пондеромоторных сил неоднородного электрического поля, возникающих вследствие поляризации частиц и среды. Величина этих сил определяется разностью проводимостей и диэлектрических проницаемостей частиц и среды, размерами частиц и напряженностью электрического поля. Осуществляется процесс диэлектрической сепарации в жидком диэлектрике, диэлектрическая проницаемость которого имеет промежуточное значение между диэлектрическими проницаемостями разделяемых минералов.

На рис. 53, а показано направление движения частиц с различными по отношению к среде и друг к другу диэлектрическими проницаемостями. Частица, обладающая диэлектрической проницаемостью ϵ_1 , большей, чем диэлектрическая проницаемость среды ϵ_2 , будет двигаться в направлении большей напряженности поля. Частица с меньшей диэлектрической проницаемостью ϵ_2 , наоборот, будет выталкиваться из зоны большей напряженности поля.

На рис. 53, б показана схема диэлектрического сепаратора. Сепаратор состоит из ванны 1, системы электродов 2, приемника 3 концентрата и приемника 4 хвостов. Система электродов представляет собой несколько параллельных отрезков проволоки, расположенных под некоторым углом к горизонтали. Знаки

зарядов проводов чередуются в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Исходный материал подается сверху в рабочее пространство сепаратора. Частицы с более высокими диэлектрическими проницаемостями и проводимостями притягиваются к электродам, а затем по ним сползают к приемнику 3. Частицы породы свободно проходят через отверстия электродов и поступают в приемник 4.

Ванна и приемники заполняются керосином, скипидаром или другой диэлектрической жидкостью. Для каждой минеральной смеси необходима жидкость с определенной диэлектриче-

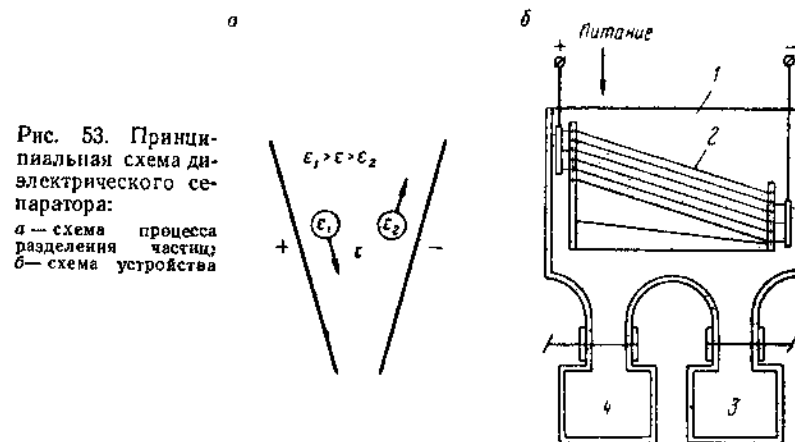


Рис. 53. Принципиальная схема диэлектрического сепаратора:
а — схема процесса разделения частиц;
б — схема устройства

ской проницаемостью. Подбор среды является очень ответственной задачей, так как она должна быть дешевой, нетоксичной, непроводящей и стойкой по отношению к действию электрического поля. Этим в сущности и сдерживается широкое промышленное применение метода диэлектрической сепарации.

§ 30. Высоковольтные устройства для электрических сепараторов

На электроды электрических сепараторов подается постоянный ток высокого напряжения, получаемый от специального выпрямительного агрегата, подключаемого к сети переменного тока промышленной частоты (50 Гц). В настоящее время электропромышленностью выпускается много различных типов выпрямительных агрегатов, находящихся применение в практике электросепарации. Основными элементами выпрямительной установки являются: повышающий трансформатор, выпрямитель, стабилизатор напряжения, сглаживающий фильтр и вспомогательные устройства (регулятор напряжения, измерительные приборы, сигнализация).

Высоковольтный трансформатор служит для преобразования электрического тока низкого напряжения (десятки сотен вольт) в ток высокого напряжения (десятки тысяч вольт). Напряжение, подаваемое на электроды промышленных электрических сепараторов, достигает 140 кВ при величине тока в несколько десятков миллиампер.

Выпрямители могут быть ламповыми (кенотроны), селеновыми или кремниевыми. Два последних являются более совершенными и характеризуются большим сроком службы, хорошей механической прочностью, высоким к. п. д. и малыми размерами. Отсутствие у них накальных цепей и движущихся частей делает их удобными в эксплуатации.

Техническая характеристика выпрямительных установок, применяемых для питания электрических сепараторов, приведена в приложении 9.

Применяются следующие схемы выпрямления токов высокого напряжения: однокенотронная (однополупериодная), двухкенотронная (двухполупериодная), четырехкенотронная (двухполупериодная) и шестикенотронная (трехфазная). Наиболее простой и экономичной схемой выпрямления токов высокого напряжения является однокенотронная, однако при низкочастотном выпрямлении (большие перерывы между импульсами тока) неполностью используется коронный разряд в сепараторе (коэффициент использования коронного разряда составляет всего 0,22). Наибольший коэффициент использования коронного разряда (0,90) достигается при шестикенотронной трехфазной схеме выпрямления. При двух- и четырехкенотронном выпрямлении коэффициент использования коронного разряда составляет 0,44.

Технология электрического обогащения требует регулировки высокого напряжения, подаваемого на электроды сепараторов. Для этой цели служат регулировочные устройства, которые должны обеспечить плавное изменение напряжения от нуля до максимума. В качестве регулировочных устройств используются реостаты или автотрансформаторы. Подробные сведения о высоковольтных агрегатах изложены в специальной литературе [9].

Измерение высокого напряжения на выходе выпрямительного агрегата осуществляют вольтметром в цепи низкого напряжения с учетом коэффициента трансформации или с помощью шаровых разрядников. Последний способ является наиболее точным и основан на зависимости пробивного напряжения от расстояния между шарами определенного диаметра. Шаровые разрядники показывают максимальное значение измеряемого напряжения. Для измерения напряжения на высоковольтных шинах промышленных электросепараторов обычно применяют разрядники с диаметром шаров 125 и 150 мм.

При измерении напряжения шары разрядника, подключенные к высоковольтным шинам, медленно сближают до получения между ними разряда. Расстояние, отвечающее измеряемому

напряжению, соответствует первой проскочившей между шарами искре. По этому расстоянию и диаметру шаров из таблиц определяют значение измеряемого напряжения.

Измерение тока в цепи сепаратора производится обычно с помощью миллиамперметра постоянного тока, включаемого непосредственно в цепь коронирующих электродов. Колебания показаний миллиамперметра свидетельствуют об утечке тока через изоляторы, что может происходить при их загрязнении или неисправности. Утечка тока может быть также при пробоях межэлектродного пространства.

Глава VIII

Подготовка и ведение процесса электрической сепарации

§ 31. Факторы, влияющие на процесс электрической сепарации

Процесс электрической сепарации зависит от ряда факторов, определяемых свойствами обогащаемого сырья, конструкцией и принципом работы сепаратора, способом подготовки материала к сепарации и технологическим режимом ведения процесса. Рассмотрим влияние некоторых из этих факторов на процесс коронной и коронно-электростатической сепарации, как наиболее распространенных методов электрического обогащения минерального сырья.

Электропроводность минералов. Электропроводностью минералов определяют скорость их разрядки на заземленный электрод и величина остаточного заряда, которая оказывает решающее влияние на эффективность процесса электросепарации. Чем больше разница в электропроводности минералов, тем значительнее отличаются траектории их движения в рабочем пространстве сепаратора и, следовательно, легче осуществить их разделение. Частицы, обладающие хорошей электропроводностью, быстро разряжаются на заземленный электрод и, имея незначительный остаточный заряд, при помощи механических сил отрываются от барабана практически сразу же после соприкосновения с ним. Плохая электропроводность частиц способствует сохранению у них остаточного заряда такой величины, которая позволяет частицам удерживаться на поверхности барабана за счет электрических сил притяжения. Чем меньше электропроводность частиц, тем длительнее они удерживаются на барабане и тем дальше окажутся от зоны отрыва частиц с более высокой электропроводностью.

Таким образом, разница в электропроводности минералов определяет степень раскрытия веера продуктов сепарации, от которой зависит четкость разделения смеси на мономинеральные фракции.

На электропроводность минералов значительное влияние оказывают состояние их поверхности, влажность и температура материала. Состоянием поверхности минералов определяется величина их поверхностной электропроводности, играющей важную роль в процессе электросепарации. Наличие на минералах загрязняющих покрытий, имеющих иной по сравнению с основным минералом вещественный состав, может привести к резкому изменению их природной поверхностной электропроводности и тем самым ухудшить условия разделения. Изменение поверхности минералов может произойти как в естественных условиях (например, за счет выветривания минералов), так и в результате обработки сырья (загрязнение пылью при измельчении, образование пленок реагентов при флотации и т. д.). Во всех случаях необходимо максимально очистить поверхность минералов от загрязнений. Минералы подвергают механической оттирке в плотных пульпах с последующей отмывкой и ультразвуковой обработкой. Для очистки поверхности минералов могут применяться растворы различных солей и кислот.

Электропроводность минералов зависит также от влажности материала и воздуха. Адсорбированная на непроводниках влага повышает поверхностную электропроводность минералов и затрудняет их отделение от проводников. Повышенная влажность воздуха способствует адсорбции влаги на поверхности минералов. Регулирование влажности материала осуществляется при помощи сушилки. Подогрев материала перед сепарацией предотвращает адсорбцию паров воды из окружающей среды.

Температура материала оказывает влияние на электропроводность некоторых минералов не только как фактор, определяющий их влажность. С повышением температуры электропроводность минералов, обладающих полупроводниковыми свойствами (гематит, пирохлор, кальцит и другие минералы), возрастает, в то время как у проводников она снижается. Температура материала является важным параметром регулировки процесса электрической сепарации. Установлено, например, что при разделении смеси минералов рутила и ильменита повышение температуры от 18—20 до 50—60°С увеличивает их извлечение в проводящую фракцию, но при повышении температуры свыше 100°С извлечение рутила в проводящую фракцию продолжает расти, а ильменита резко падает [12].

Контактное сопротивление. Величина контактного сопротивления, через которое частица разряжается на заземленный электрод, в значительной степени определяет эффективность разделения минералов в процессе электрической сепарации. Чем выше контактное (переходное) сопротивление между частицей

и заземленным электродом, тем больше величина остаточного заряда, определяющего длительность времени притяжения частицы к электроду.

Контактное сопротивление зависит от формы частицы, степени загрязненности ее поверхности, а также от материала и состояния поверхности заземленного электрода.

Крупность частиц. От крупности частиц зависит величина зарядов, которые они получают в поле коронного разряда. Величина заряда частицы пропорциональна квадрату ее радиуса [см. формулу (56)]. Однако с увеличением крупности частицы возрастает также и центробежная сила, отрывающая ее от поверхности барабана (пропорционально кубу радиуса). При большой разнице размеров частиц процесс их четкого разделения затрудняется. Крупная непроводящая частица может оторваться от барабана одновременно с более мелкой проводящей частицей, и, наоборот, очень тонкие проводящие частицы попадают в непроводящую фракцию. Таким образом, для получения высоких технологических показателей процесса электросепарации необходимо иметь узко классифицированный материал.

Резкое ухудшение процесса электросепарации минералов вызывает наличие в исходном материале большого количества пылевидных частиц. За счет наличия тонких частиц на поверхности более крупных различие в поверхностной электропроводности разделяемых минералов сглаживается и процесс электросепарации нарушается. Кроме того, наличие тонкодисперсных частиц вызывает уменьшение коронного тока и снижение эффективности зарядки частиц. Поэтому перед электросепарацией материал должен подвергаться тщательному обеспыливанию.

Вещественный состав минералов и содержание их в смеси. Непостоянство вещественного состава разделяемых минералов, наличие в них инородных примесей могут оказать существенное влияние на показатели электросепарации. Включения железосодержащих минералов в цирконе способны настолько увеличить его электропроводность, что он попадает в проводящую фракцию. Непостоянство состава касситерита, граната и других минералов отрицательно сказывается на процессе их разделения.

Показатели электросепарации зависят также от содержания разделяемых минералов в исходном материале. Если содержание непроводников в смеси незначительно, то в этом случае легко получить высококачественную проводящую фракцию, и, наоборот, при большом содержании непроводников для получения проводящей фракции требуется несколько перемыкательных операций. При одинаковом содержании проводников и непроводников в исходном материале разделение его на проводящую и непроводящую фракции осуществляется в несколько приемов электросепарации.

Напряжение на электродах. Величина напряжения на коронирующем электроде определяет силу коронного тока в межэлект-

родном пространстве и является важным параметром регулировки процесса электросепарации. С увеличением напряжения между электродами сила коронного тока возрастает. Благодаря лучшей ионизации воздуха, увеличению числа ионов в межэлектродном пространстве создаются условия для получения частицами более сильных электрических зарядов, а также появляется возможность зарядки большего количества частиц.

Величина заряда частицы, как известно, определяет силу притяжения ее к осадительному электроду. Поэтому при электросепарации крупных минералов во избежание отрыва непроводников от вращающегося осадительного электрода необходимо увеличивать напряжение между электродами. В этом случае выход непроводящей фракции повышается. При сепарации тонкозернистых материалов, наоборот, напряжение может быть снижено.

При сепарации различных минеральных смесей следует также учитывать влияние полярности коронирующего электрода. Определить полярность проволочного коронирующего электрода легко по характеру его свечения. При положительной полярности свечение более равномерное, чем при отрицательной.

Расстояние между электродами. Величина коронного тока и, следовательно, эффективность зарядки минералов в поле коронного разряда зависит также от расстояния между коронирующим и заземленным электродами. Уменьшая это расстояние, увеличивают ток короны и наоборот. Изменением межэлектродного расстояния можно регулировать процесс электросепарации так же, как и изменением напряжения на коронирующем электроде, хотя второй способ является более удобным. Расстояние между электродами устанавливается в процессе отработки режима сепарации и при работе сепаратора, как правило, не изменяют.

Коронирующий электрод должен быть так расположен относительно осадительного электрода, чтобы зарядка частиц происходила сразу же при поступлении на поверхность осадительного электрода, не допуская их отрыва центробежными силами.

Скорость вращения осадительного электрода. Воздействие линейной (окружной) скорости вращения барабана на процесс электросепарации проявляется через центробежную силу, которая является основной силой, отрывающей частицы от поверхности барабана. С ростом центробежной силы создаются благоприятные условия для выделения проводников, однако чрезмерное ее увеличение может привести к тому, что в проводящую фракцию попадут и те непроводники, которые не смогут удержаться на барабане силами электрического притяжения. Повышенное засорение проводящей фракции непроводниками наблюдается также и при слишком малой скорости вращения барабана. В этом случае в проводящей фракции оказываются те непроводники, которые успевают разрядиться на заземленный электрод до того момента, когда они будут вынесены в соответствующий бункер. Поэтому для каждого конкретного сырья существует оптимальная

скорость вращения барабана, которая определяется опытным путем. Надо иметь в виду, что со скоростью вращения барабана связано время пребывания частиц в зоне коронного разряда, определяющее величину их заряда, а также время разрядки частиц на заземленный электрод. Важно выбрать такую скорость вращения барабана, которая обеспечивала бы максимальную разность остаточных зарядов разделяемых частиц.

От скорости вращения осадительного электрода зависит также производительность сепаратора. Увеличивая скорость вращения, можно повысить производительность сепаратора, однако не всегда при этом сохраняется качество продуктов сепарации. Поэтому выгоднее иногда получить прирост производительности не за счет скорости вращения барабана, а в результате увеличения его диаметра. В этом случае важно правильно определить соотношение линейной (окружной) скорости и диаметра электрода.

§ 32. Подготовка материала к сепарации

Для повышения эффективности процесса электрической сепарации исходный материал подвергают различным подготовительным операциям: сушке, обеспыливанию, классификации по крупности, оттирке и промывке, обработке ультразвуком и реагентами, облучению. В зависимости от характеристики сырья применяется одна или несколько операций его подготовки к разделению методом электрической сепарации.

Сушка. Повышенная влажность материала оказывает вредное влияние на процесс электросепарации двояким образом. Во-первых, влага может сильно изменить природную электропроводность минералов, особенно минералов-непроводников. Во-вторых, при повышенной влажности возрастает слипание частиц, независимо от их вещественного состава и электрофизических свойств. Мелкие частицы пустой породы могут прилипнуть к ценным минералам и увлекаться в концентрат, ухудшая его качество. Таким образом, удаление излишней влаги является обязательной операцией перед электрическим обогащением.

При электросепарации основную роль играет поверхностная влажность материала (напомним, что различают еще капиллярную влажность, присутствующую в порах минеральных частиц, и конституционную, или химически связанную, влажность). Поэтому при сушке необходимо удалить поверхностную влагу, и процесс электросепарации будет осуществляться успешно, несмотря на то, что общее содержание влаги в материале может быть в отдельных случаях (при большой пористости частиц) достаточно высоким. Температура, при которой из материала удаляется поверхностная влага, равна 150—200° С. Высушенный при такой температуре материал имеет влажность 0,5—1,0%.

Сушка влажного материала осуществляется в сушильных печах различной конструкции. Наиболее распространены в про-

мысленности барабанные вращающиеся печи и печи кипящего слоя. Последние являются наиболее производительными, так как в кипящем слое почти каждую минеральную частицу омывает горячий воздух. В последнее время применяется радиационная сушка различных материалов, основанная на использовании лучистой энергии, выделяемой раскаленными твердыми телами.

Обеспыливание и классификация по крупности. Как уже указывалось, при наличии в материале большого количества пылевидных частиц (менее 30—40 микрон) процесс сепарации нарушается, так как они налипают на более крупные зерна, на поверхность осадительного электрода и другие детали сепаратора, вызывая искровые пробой между электродами. Обеспыливание материала может осуществляться в камерных коронных сепараторах или в циклонах.

Лучшие показатели электросепарации на барабанных сепараторах получают в том случае, если материал предварительно подвергнут классификации по крупности. Это особенно важно при небольшом различии в электропроводности разделяемых минералов. Классификацию материала производят на грохотах, в гидроциклонах или камерных сепараторах. Шкала классификации определяется опытным путем, причем чем она более узкая, тем выше показатели сепарации.

Очистка поверхностей минералов. Оптимальные условия для процессов зарядки и разрядки минералов, определяющих четкость их разделения электросепарацией, могут быть созданы только в том случае, если поверхности минералов будут чистыми, т. е. если на них отсутствуют инородные покрытия и примазки, искажающие естественные электрофизические свойства минералов. Однако практически поверхности всех минералов в той или иной степени загрязнены, причем характер этих загрязнений может быть различным. Поверхности одних минералов покрываются пылью или реагентами в процессе их переработки, на поверхности других имеются пленки различного вещественного состава, образовавшиеся в результате окисления основного минерала или иных процессов.

Удаление загрязнений первого типа производится при помощи оттирки и промывки материала или ультразвуковой обработкой. Для удаления более прочных покрытий второго типа применяется обработка материала в растворах различных кислот и солей. Например, пленка халькопирита с поверхности частиц сфалерита и пирита достаточно легко удаляется промывкой минералов в растворе плавиковой кислоты.

Обработка поверхностей минералов реагентами. Для повышения селективности разделения минералов электросепарацией в ряде случаев выгодно их обработать поверхностно-активными веществами, изменяющими в нужном направлении их поверхностную электропроводность.

Органические реагенты, избирательно адсорбируясь или хими-

чески закрепляясь на поверхности тех или иных минералов, придают им свойство гидрофобности подобно тому, как это происходит при флотации. Пленка реагента препятствует адсорбции влаги на минерале и тем самым снижает его поверхностную электропроводность.

Неорганические реагенты могут увеличивать электропроводность минералов, образуя на их поверхности пленку с повышенной электропроводностью.

Реагенты для обработки минералов могут применяться в виде раствора или аэрозоля. В последнем случае они наносятся на поверхность сухих минералов. Рекомендуемые для обработки некоторых минералов реагенты приведены в литературе [9].

Электропроводность отдельных минералов изменяется под действием ультрафиолетового и рентгеновского облучения, термической обработки.

Целесообразность применения того или иного метода искусственного изменения электропроводности минералов должна в каждом случае обосновываться технико-экономическими показателями.

§ 33. Наладка и обслуживание электрических сепараторов

Эффективная работа электрических сепараторов зависит от правильности их монтажа, установки требуемых режимных параметров и тщательного наблюдения за ходом процесса сепарации.

При монтаже сепаратора необходимо обеспечить полную герметизацию корпуса, загрузочных и приемных бункеров, смотровых и ремонтных люков. Сепаратор должен быть прочно установлен на фундаменте и не вибрировать во время работы. С особой тщательностью должна монтироваться электрическая схема сепаратора. Необходимо исключить возможность поражения электрическим током обслуживающего персонала, предотвратить утечку тока и пробой на заземленные части сепаратора.

После установки сепаратора проверяется состояние блокировки, электродержателей, надежность заземления, работа подогревателей, включение и выключение отдельных узлов сепаратора.

После монтажа или ремонта электрических сепараторов производится их наладка, при которой проверяется и регулируется следующее:

- соответствие ширины щели питателя производительности сепаратора и равномерность подачи материала;
- скорость вращения осадительных электродов;
- правильность установки электродов;
- исправность и надежность работы отсекателей;

соответствие показаний вольтметра напряжению, подаваемому на коронирующий электрод.

Питатель сепаратора должен обеспечить равномерную подачу в рабочую зону строго определенного количества материала, возможность регулировки в определенных пределах производительности сепаратора, а также при необходимости полное прекращение питания. Если ширина щели питателя на всем его протяжении различная (например, в результате перекоса шибера), то материал будет неравномерно распределяться по длине осадительного электрода и процесс разделения нарушится. Причиной неравномерной подачи материала на электрод может быть также неровность (шероховатость) питающих лотков.

Скорость вращения осадительных электродов барабанных сепараторов устанавливается при отработке режима сепарации каждого конкретного сырья и в процессе их эксплуатации обычно не регулируется. Однако вследствие износа приводных шкивов и ослабления натяжных клиновых ремней скорость вращения электродов может измениться. Во время наладки необходимо устранить причину этого изменения. Проверяется горизонтальность установки и биение осадительных электродов. Биение электродов не должно превышать 0,3 мм.

В процессе наладки проверяется также правильность установки электродов относительно друг друга, надежность крепления коронирующих электродов. При слабом натяжении проволоочные электроды начинают вибрировать после подачи на них напряжения, что приводит к нарушению процесса сепарации.

Отсекатели должны обеспечить требуемое разделение веера продуктов и не допускать пересыпания их из одного приемного бункера в другой. Это проверяется установкой отсекателей в различное положение и наблюдением за их работой. Если обнаружены дефекты в изготовлении или сборке отсекатели ремонтируют или заменяют.

Проверку соответствия показаний вольтметра напряжению, подаваемому на коронирующий электрод, производят при помощи шаровых разрядников и переносных киловольтметров.

Сепаратор может быть включен в работу только после проверки состояния всех его рабочих узлов и устранения обнаруженных неисправностей. Перед пуском сепаратора необходимо убедиться в правильности установки электродов, исправности щеточных устройств, заземления, вытяжной вентиляции.

Пуск сепаратора в работу производится следующим образом. Вначале включается высоковольтная выпрямительная установка и постепенно повышается напряжение, подаваемое на электроды. После установки требуемой величины напряжения включаются электродвигатели осадительных электродов и питателя и регулируется необходимая производительность.

Затем осуществляется настройка сепаратора на требуемое качество и выход продуктов.

Остановка сепаратора производится следующим образом: прекращается подача питания, отключаются электродвигатели привода электродов и питателя, постепенно снижается напряжение и отключается выпрямительная установка.

В процессе работы сепаратора необходимо следить за качеством и выходом продуктов сепарации, периодически проверяя их визуально или при помощи соответствующих приборов (микроскопа, весов). Качество и выход продуктов могут измениться в связи с изменением минералогического состава, крупности, температуры и других свойств исходного сырья.

Причинами повышенного засорения проводящей фракции непроводящими частицами могут быть: снижение температуры исходного материала, уменьшение напряжения на коронирующих электродах, увеличение расстояния между коронирующим и заземленным электродами, увеличение скорости вращения осадительного электрода, производительности сепаратора, крупности исходного материала. Снизить засорение проводящей фракции удастся в результате увеличения напряжения между электродами. Однако в отдельных случаях требуется изменение скоростного режима процесса, производительности сепаратора или осуществление предварительной классификации исходного материала по крупности.

Повышение качества непроводящей фракции достигается в результате уменьшения напряжения между электродами, снижения температуры исходного материала, увеличения скорости вращения осадительного электрода, а также при помощи отсекателей.

При работе сепаратора чаще всего регулировку процесса разделения осуществляют изменением напряжения, производительности и положения отсекателей. Своевременная корректировка этих параметров позволяет избежать ухудшения технологических показателей сепарации.

Необходимо следить за бесперебойной и равномерной подачей питания в рабочую зону сепаратора и своевременным удалением из сепаратора продуктов обогащения. Обслуживающий персонал должен контролировать высокое напряжение на электродах, работу движущихся частей, вытяжной вентиляции.

Следует помнить, что условием успешной работы электрических сепараторов является высокая квалификация обслуживающего персонала. Хорошее знание устройства и принципа работы сепаратора, умение правильно использовать все факторы, влияющие на процесс разделения, тщательное наблюдение за процессом и своевременное устранение его нарушений обеспечивают получение наилучших технологических и технико-экономических показателей процесса электрической сепарации.

§ 34. Правила безопасности при обслуживании электрических сепараторов

К обслуживанию электрических сепараторов допускаются лица, достигшие 18-летнего возраста, хорошо знающие их устройство и принцип работы, прошедшие обучение и проверку знаний по правилам технической эксплуатации и правилам безопасности при работе на электрических установках высокого напряжения.

Конструкция промышленных электрических сепараторов и система их электроснабжения должны обеспечивать защиту обслуживающего персонала от поражения электрическим током. Корпус сепаратора должен быть пыленепроницаемым. Все металлические части, нормально не находящиеся под напряжением, надежно заземляются. Заземление выполняется из стальных полос сечением не менее 100 мм², соединяемых сваркой. Все токоведущие кабели ограждаются и недоступны для прикосновения.

Дверцы, обеспечивающие доступ к внутренним частям сепаратора, должны быть оснащены блокирующими заземленными устройствами для предотвращения случайного соприкосновения персонала с частями сепаратора, находящимися под высоким напряжением.

Сепараторы оборудуются съемниками остаточных зарядов, автоматически замыкающими корону и шинопроводы на корпус сепаратора при открытии ограждающих их устройств.

Высоковольтная установка сепаратора должна находиться в закрытом корпусе и заземляться.

Для удаления пыли, а также газообразных окисных соединений азота, вредно действующих на организм человека, сепараторы подключаются к вытяжной вентиляционной системе.

При работе на электрических сепараторах должны соблюдаться следующие меры безопасности:

1. Перед началом работы необходимо убедиться в наличии и исправности заземления, блокировки, ограждений и отсутствии в электросепараторе посторонних предметов.

2. Запрещается включать сепаратор в работу при неисправных блокировочных устройствах, съемниках остаточных зарядов, неисправной вентиляции, а также при открытых дверцах корпуса сепаратора.

3. Сепаратор должен быть снабжен плакатом с надписью «Стоп! Высокое напряжение. Опасно для жизни», а при производстве ремонтных и наладочных работ — «Не включать — работают люди!».

4. Наблюдение за работой коронирующих электродов допускается только через специальные смотровые окна сепаратора; категорически запрещается прикосновение к внутренним частям сепаратора при помощи любых предметов.

5. Производить корректировку положения электродов и устранять другие неисправности внутри корпуса сепаратора разрешается только после остановки электродвигателей привода электродов, отключения высокого напряжения и снятия остаточного заряда при помощи стационарных или переносных съемников.

6. При производстве влажной уборки цеха электросепарации необходимо принять меры, препятствующие попаданию влаги на рабочие узлы сепаратора и токоведущие кабели.

7. В случае поражения человека электрическим током должны быть приняты все меры для освобождения пострадавшего от действия тока и оказания ему первой помощи.

Глава IX

Практика электрического обогащения

Электрическая сепарация применяется в схемах доводки титано-циркониевых, тантало-ниобиевых, оловянно-вольфрамовых, монацитовых и других концентратов. На рис. 54 показана принципиальная технологическая схема обогащения титано-циркониевых россыпей одного из месторождений Украины.

Россыпи месторождения связаны с прибрежно-морскими фракциями осадочных пород полтавского и сарматского возраста. Рудными минералами обогащены только полтавские и сарматские пески, причем наиболее богаты верхние тонкозернистые пески полтавской свиты и нижние мелкозернистые пески сарматского яруса.

Основными полезными минералами являются: циркон, рутил, ильменит, дистен, силлиманит, ставролит, турмалин. Вмещающая порода состоит из кварца и глины. Рудные минералы неодинаковы по крупности и колеблются в пределах от 0,05 до 0,15 мм. По степени обогащения основными тяжелыми минералами, granulометрическому составу и характеру окраски в рудной залежи месторождения (по разрезу сверху вниз) отчетливо выделяются четыре типа руд:

Сарматский ярус:

1. Глинистые зеленовато-серые мелкозернистые плотные пески с включением каолинистых и карбонатных песчаников.

2. Серые и черные полосчатые из-за горизонтальной слоистости, богатые мелкозернистые пески.

3. Белые и желтые мелко- и среднезернистые пески с низким содержанием тяжелой фракции.

Полтавская свита:

4. Серые тонкозернистые каолинистые пески.

Верхняя часть сарматского яруса представлена глинистыми песками (содержание глины 28—29%), средняя и нижняя части

горизонта содержат всего 12—15% глины, а в центральной части наблюдается снижение глины до 4,5—8,0%.

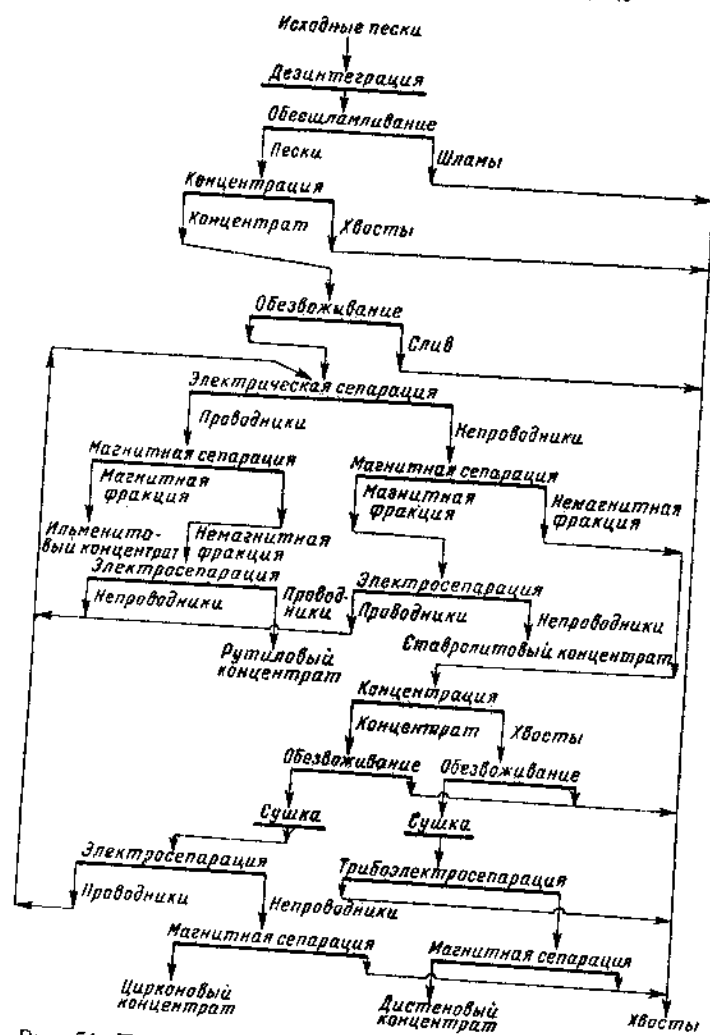


Рис. 54. Принципиальная технологическая схема обогащения титано-циркониевых россыпей

Технологический процесс обогащения состоит из следующих операций:

1. Трехстадийная дезинтеграция и двухстадийное обесшламливание песков.
2. Гравитационное получение коллективного концентрата (сумма всех полезных минералов).

3. Обезвоживание и сушка коллективного концентрата.
4. Разделение коллективного концентрата электрической сепарацией на титаносодержащие минералы (проводники) и цирконалюмосиликаты (непроводники).
5. Разделение проводников на ильменит и рутил методом электромагнитной сепарации.
6. Доводка рутилового концентрата электрической сепарацией.
7. Разделение непроводников на ставролитовый концентрат и циркон-дистен-силлиманит-кварцевый продукт методом электромагнитной сепарации.
8. Доводка ставролитового концентрата методом электрической сепарации.
9. Гравитационное получение черновых цирконового и дистен-силлиманитового концентратов.
10. Обезвоживание и сушка цирконового и дистен-силлиманитового концентратов.
11. Доводка цирконового концентрата методами электрической и электромагнитной сепарации.
12. Доводка дистен-силлиманитового концентрата методами трибоэлектростатической и электромагнитной сепарации.

Рассмотрим более подробно технологию доводки коллективного концентрата. Коллективный концентрат, содержащий главным образом ильменит, рутил, лейкоксен, циркон, ставролит, турмалин, дистен-силлиманит и кварц (табл. 11), после сушки во вращающихся барабанных печах подвергается разделению на проводящую и непроводящую фракции в коронно-электростатических сепараторах ЭКС-1250 и СЭС-2000. В проводящую фракцию извлекаются ильменит, рутил и лейкоксен, в непроводящую — циркон, ставролит, турмалин, дистен-силлиманит и кварц. Взаимосоренность фракций составляет около 6—8%. Разделение осуществляется при температуре исходного материала $80 \pm 100^\circ \text{C}$. Рабочее напряжение на электродах от 16 до 20 кВ, частота вращения осадительных электродов 460—500 об/мин.

Проводящую и непроводящую фракции подвергают отдельно магнитной сепарации на сепараторах с сильным полем 4ЭВС-36/100 (ЭРС-6). Рутил, обладая хорошей электропроводностью и очень низкой магнитной восприимчивостью, сосредоточивается в немагнитной фракции; в магнитной фракции получают готовый ильменитовый концентрат. Из непроводящей фракции с помощью магнитной сепарации в магнитную фракцию выделяются ставролит, турмалин и оставшийся ильменит. Немагнитная фракция непроводников представлена в основном цирконом, дистен-силлиманитом и кварцем. Магнитная фракция непроводников подвергается электрической сепарации с получением готового ставролитового концентрата, а немагнитная фракция непроводников направляется на концентрационные столы. Концентрат столов

после сушки подвергается электрической и магнитной сепарации, в результате чего получается готовый цирконовый концентрат. Хвосты концентрации после сушки разделяются на трибоэлектростатических сепараторах СТЭ, где выделяется дистен-силлиманитовый концентрат и кварцевый продукт.

Таблица 11
Ситовая характеристика и распределение минералов в коллективном гравитационном концентрате

Класс, мкм	Выход, %	Содержание, %								
		циркона	рутила	ильменита	дистена	ставролита	турмалина	лейкоксена	кварца	прочих
+400	9,32	—	—	—	—	—	—	—	—	—
-400+280	1,05	—	0,01	0,02	0,18	0,40	0,05	—	99,38	0,62
-280+200	1,58	—	0,25	3,80	11,10	11,60	2,12	0,50	99,34	—
-200+140	12,32	1,24	3,82	22,10	28,68	14,85	1,88	2,53	70,60	0,03
-140+100	14,27	4,38	9,45	39,76	19,90	7,95	1,09	4,17	13,0	—
-100+71	53,36	9,22	16,80	56,40	5,93	2,50	0,53	4,29	4,00	0,30
-71	8,10	16,20	17,85	59,44	1,51	1,08	0,22	2,70	1,0	—
Исходный	100,0	7,01	12,23	43,37	9,84	4,57	0,72	3,42	18,57	0,27

Таким образом, в результате доводки гравитационного коллективного концентрата получают следующие концентраты:

ильменитовый — 96—98% ильменита или 60,0—61,5% TiO_2 ;

извлечение ильменита 85%;

рутиловый — 92—94% рутила и 4—5% ильменита или 91—95% TiO_2 ; извлечение рутила 90%;

цирконовый — 92—97% циркона или 60,0—65,0 ZrO_2 ; извлечение циркона 91%;

дистен-силлиманитовый — 90—93% дистена и силлиманита или 56—58% Al_2O_3 ; извлечение дистен-силлиманита 65%;

ставролитовый — 85—90% ставролита или 45—47% Al_2O_3 ; извлечение ставролита 70%.

Структура затрат по переделам одной обогатительной фабрики приведена в табл. 12 (по данным В. А. Разводовского). В отечественной и зарубежной практике обогащения электрическую сепарацию применяют также при доводке тантало-ниобиевых гравитационных концентратов. Черновые тантало-ниобиевые концентраты (танталит-колумбитовые, пирохлоровые и лопаритовые) характеризуются низким содержанием ценного компонента и многообразием входящих в разделяемый комплекс минералов, что требует сложных многооперационных схем их обработки. Помимо тантала и ниобия в минералах содержатся железо, марганец, редкие земли, торий, уран, титан, цирконий. Содержание Ta_2O_5 в танталитах может достигать 86,1%, а Nb_2O_5 в колумбитах — 82,7%. Состав танталитов и колумбитов может изменяться даже в пределах одного месторождения, что затрудняет доводку концентратов.

Таблица 12

Структура затрат по переделам на обогатительной фабрике

Переделы	% по переделам	
	к общей сумме	к общей сумме по доводке
Дезинтеграция	32,7	—
Гравитация, всего	34,9	—
в том числе:		
коллективного концентрата	31,8	—
непроводников	3,1	—
Доводка, всего	32,4	—
в том числе:		
обезвоживание	1,3	3,9
сушка	3,5	11,1
коронно-электростатическая сепарация	13,7	42,8
магнитная сепарация	6,3	19,3
трибоэлектростатическая сепарация	0,7	2,4
транспорт продуктов	4,1	12,8
складирование и упаковка	2,8	7,7

Практическое значение минералов группы танталита-колумбита очень велико. Танталит является важнейшим источником получения тантала, а колумбит — ниобия.

Из сопутствующих ценных минералов в коллективный тантало-ниобиевый концентрат входят монацит, циркон, касситерит, берилл, ксенотим и ильменит, которые при доводке могут выделяться в отдельные концентраты.

Первичным методом обогащения тантало-ниобиевых руд является гравитация. Полученный гравитационный концентрат доводится до кондиционного флотогравитацией, флотацией, магнитной и электрической сепарацией, иногда в сочетании с химическими способами.

Схема доводки коллективного тантало-ниобиевого концентрата приведена на рис. 55 [13]. Коллективный концентрат после классификации подвергается магнитной сепарации, которая обеспечивает выделение отдельно ильменит-гранатового и танталит-колумбитового продуктов. Небольшой процент танталит-колумбита остается в немагнитной фракции. Ильменитовый концентрат получается посредством разделения ильменит-гранатового продукта на коронно-электростатическом сепараторе. Магнитная фракция II, в которой содержится основное количество танталит-колумбита, и немагнитная фракция подвергаются концентрации на столах, сушке, магнитной и электрической сепарации. Из немагнитной фракции первого приема магнитной сепарации на концентрационных столах в концентрат извлекаются касситерит, циркон и слабомагнитные разности танталит-колумбита.

Дополнительным рассевом и магнитной сепарацией концентрат столов разделяют на два продукта: монацит-танталит-колумбитовый и касситерит-цирконовый. Окончательная доводка этих продуктов с выдачей готовых концентратов (монацитового,

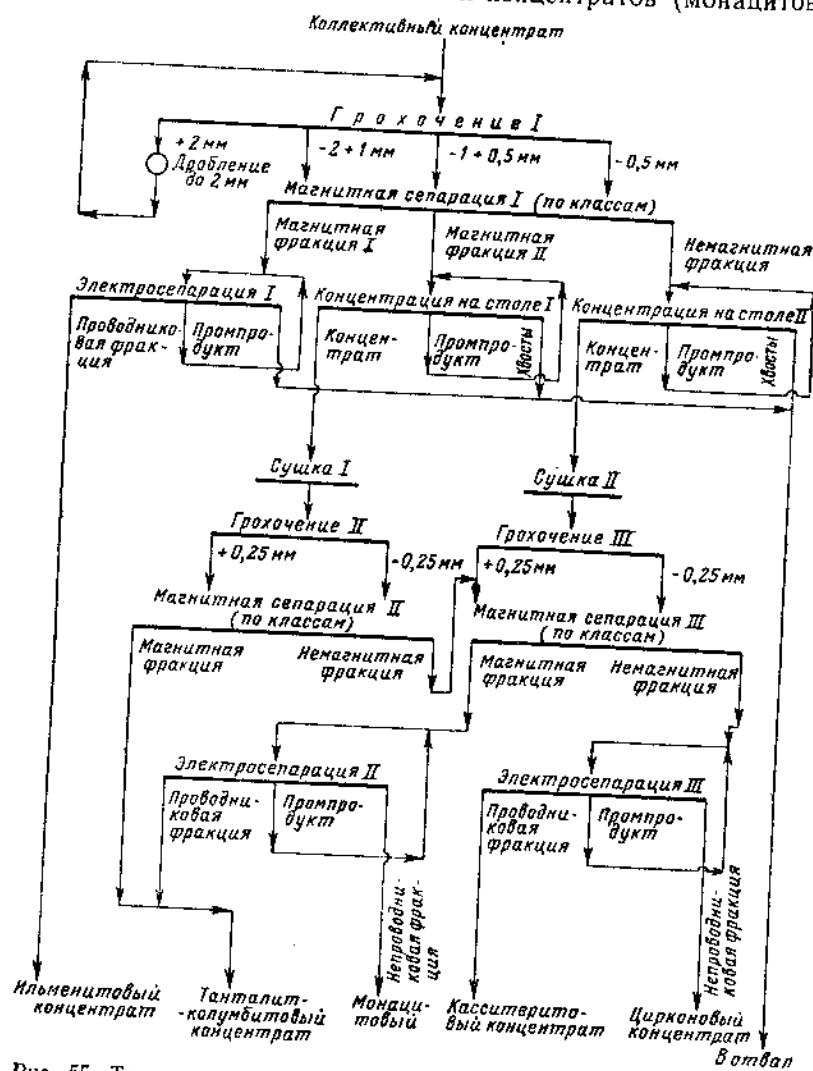


Рис. 55. Технологическая схема доводки тантало-ниобиевых концентратов

танталит-колумбитового, касситеритового и цирконового) производится электросепарацией.

Доводка танталит-колумбитовых концентратов по приведенной схеме обеспечивает получение следующих концентратов:

танталит-колумбитового с содержанием пятиоксида тантала около 28% при извлечении 65—70%; касситеритового с содержанием олова около 49% при извлечении 85—87%; монацитового с содержанием монацита около 90% при извлечении 92—96%; ильменитового с содержанием ильменита около 96% при извлечении 94—96%.

Доводка оловянно-вольфрамовых концентратов с помощью магнитной и электрической сепарации позволяет получать кондиционные касситеритовый и вольфрамитовый концентраты при достаточно высоком извлечении металлов.

Важнейшим оловосодержащим минералом является касситерит. Касситерит очень хрупок (что необходимо учитывать при выборе схемы обогащения), но химически устойчив, поэтому переходит в россыпи, которые часто образуют крупные месторождения. Наиболее важное значение имеют россыпи, образовавшиеся в результате разрушения пегматитовых и кварц-касситеритовых месторождений. Состав кварц-полевощпатовых руд разнообразен; в них присутствуют кварц, топаз, полевые шпаты, слюда, флюорит, турмалин, берилл, из рудных минералов — касситерит, вольфрамит, шеелит и сульфиды.

Промышленно важными минералами вольфрама являются ферберит, вольфрамит, гюбнерит, шеелит.

Первичные месторождения вольфрама бывают двух типов: пневматолитовые и гидротермальные; вторичные месторождения представлены россыпями.

Сопутствуют шеелиту и вольфрамиту касситерит, арсенопирит, пирит, молибденит, пирротин, барит, халькопирит, цинковая обманка, сидерит, гранат, топаз, турмалин, слюда, полевые шпаты, кальцит, кварц.

Для обогащения оловянно-вольфрамовых руд и россыпей применяют гравитационные методы, флотацию, флотогравитацию, магнитную и электрическую сепарацию.

Принципиальная схема доводки оловянно-вольфрамовых концентратов заключается в следующем. Концентрат после предварительного грохочения обрабатывается на магнитных сепараторах отдельно по классам. Из концентрата селективно извлекаются: в первую магнитную фракцию — магнетит, во вторую — ильменит, в третью — вольфрамит. В немагнитной фракции концентрируются шеелит, касситерит, сульфиды. Готовый ильменитовый концентрат получают электросепарацией. Немагнитная фракция также разделяется электросепарацией, при которой в проводниковой фракции сосредоточивается касситерит, а в непроводниковой — шеелит. Окончательная доводка касситеритового продукта осуществляется флотацией. Из непроводниковой фракции с помощью концентрации на столах получают шеелитовый концентрат.

Доводка монацитовых концентратов осуществляется по довольно сложной схеме, так как минералогический состав мона-

цитовых концентратов весьма разнообразен. Кроме монацита и ксенотима в них присутствуют ильменит, циркон, рутил, иногда золото, гранат, пироксены, амфиболы, эпидот, кварц, сфен, магнетит, гематит.

Так как минералы, входящие в концентрат, в большинстве являются магнитными, доводку начинают с магнитной сепарации. Магнитную сепарацию ведут в несколько стадий при постепенном увеличении напряженности магнитного поля в рабочей зоне сепаратора. Вначале извлекают магнетит и ильменит-гранатовый продукт. Затем при повышенной напряженности поля в магнитную фракцию выделяют пироксены и эпидот. И наконец, при более высокой напряженности поля извлекаются монацит и ксенотим. В немагнитной фракции остаются циркон, рутил, золото, кварц.

Электросепарацией из ильменит-гранатового продукта получают ильменитовый концентрат с содержанием двуокиси титана более 42%. Из немагнитной фракции в результате обогащения на концентрационных столах выделяются цирконовый концентрат с содержанием двуокиси циркония более 60% и золото. Если в коллективном концентрате имеется промышленное содержание рутила, то для его выделения также служит электросепарация.

Электрическая сепарация применяется также при извлечении алмазов. Обычно электросепарации подвергаются гравитационные концентраты крупностью менее 4 мм. Отделение алмаза от сопутствующих минералов основано на различии в их электропроводности. Алмаз является хорошим непроводником, в то время как большинство сопутствующих минералов обладают относительно большой электропроводностью. Электрическая сепарация алмазов осуществляется на коронно-электростатических сепараторах.

Электрическая сепарация применяется при обогащении кварцевого и полевошпатового сырья. Обогащением жильного кварца Лянгарского месторождения на сепараторах ЭКС-1250 после отделения от кварца полевых шпатов, сланцев и других минеральных примесей выделяется кварцевый концентрат, содержащий 98—98,4% SiO_2 .

После обработки пегматитов на электросепараторе ЭКС-1250 получают готовый полевошпатовый концентрат, содержащий 15% кварца и 82% шпата при извлечении последнего 52,4%.

Эффективно обогащаются электрическими методами комплексные мелко- и тонковкрапленные низкосортные магнитные и немагнитные железные руды, состоящие из электропроводных рудных (гематит, магнетит, мартит) и неэлектропроводных нерудных (кварц и др.) минералов.

Электрические методы применяются также при обогащении асбестовых руд, стекольных и формовочных песков, каменных и других солей, фосфоритов, керамического сырья и других полезных ископаемых.

Раздел третий

СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ. КОНТРОЛЬ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Глава X

Специальные методы обогащения

§ 35. Обогащение сортировкой

Методы обогащения сортировкой основаны на различии во внешнем виде разделяемых минералов (цвет, блеск, форма зерен), а также на использовании специфических свойств некоторых минералов (радиоактивность, способность люминесцировать). Сортировка может производиться вручную или механизированным и автоматизированным способами.

Ручная сортировка

При ручной сортировке рабочие-выборщики отбирают куски пустой породы или руды сдвигающейся рудоразборной лентой или вращающегося вокруг вертикальной оси круглого рудоразборного стола. Для усиления различия в цвете и блеске разделяемых кусков применяется орошение водой для удаления пыли с их поверхности, а также специальное освещение при помощи газоразрядных ртутных ламп или ламп с различными люминоформами. Например, если осветить куски свинцово-цинковой руды синим светом, то свинцовый блеск приобретает слабофиолетовую окраску, а цинковая обманка — буровато-желтую.

Ручная сортировка является дорогим и трудоемким процессом и применяется в настоящее время очень редко. Кроме того, ручная сортировка не применима для мелкого материала, так как разборка его непроизводительна и неэкономична. Крупность кусков руды при ручной сортировке должна быть в пределах 50—250 мм. Применяется ручная сортировка в тех случаях, когда при других методах обогащения качество полезных ископаемых снижается (обогащение длиноволокнистого асбеста или крупнолистовой слюды, извлечение драгоценных камней).

Радиометрическая сепарация

Радиометрическая сепарация является механизированным и автоматизированным способом сортировки, при котором разделение минералов осуществляется в зависимости от интенсивности

различных видов их излучения или различной способности минералов ослаблять излучение внешних источников.

В настоящее время промышленное применение получили методы радиометрической сепарации, основанные на различии естественной радиоактивности разделяемых минералов, а также на различии в люминесценции и отражении света.

Принципиально процесс радиометрической сепарации можно представить себе следующим образом. По ленте или вибрационному лотку монослоем перемещаются куски руды, обладающие различной интенсивностью излучения, например, гамма-излучения.

Интенсивность излучения измеряется с помощью специально устройства, передающего сигналы через усилитель на исполнительный механизм, автоматически отделяющий куски или фракции с повышенной или, наоборот, с пониженной интенсивностью излучения.

Различают следующие методы радиометрической сепарации минерального сырья [14]:

1. Авторадиометрический метод основан на использовании излучений (главным образом гамма-излучения) естественно радиоактивных химических элементов. Этот метод получил широкое применение при обогащении урановых руд.

2. Фотонейтронный метод основан на использовании различных минералов в интенсивности нейтронного излучения, испускаемого при облучении руды гамма-лучами. Применяют этот метод для обогащения бериллиевых руд, так как ядра бериллия обладают способностью испускать нейтроны при облучении гамма-лучами.

3. Люминесцентный метод основан на использовании различий в интенсивности люминесценции минералов под воздействием гамма-рентгеновского или ультрафиолетового излучения. Способностью люминесцировать обладают кальцит, шеелит и другие минералы. В промышленных масштабах люминесцентный метод применяют для обогащения алмазов.

4. Фотометрический метод основан на использовании различий минералов в интенсивности отражения рассеянного света. Обогащение осуществляется в фотометрической камере, в которой минералы освещаются на специально подобранном однородном по цвету фоне, а отраженный от них свет улавливается датчиками. В качестве датчиков используются фотоэлементы и фотомножители, обладающие высокой чувствительностью к свету.

Фотометрический метод в промышленных условиях применяется для обогащения кварца, мела, магнетита и других полезных ископаемых.

5. Нейтронно-активационный метод основан на различии в интенсивности излучения радиоактивных изотопов, образующихся при облучении руды потоком нейтронов. (Этот метод в настоящее время находится в стадии разработки.)

6. Гамма-абсорбционный метод основан на различии в способности минералов поглощать пропускаемые через них рентгеновские или гамма-лучи. Этот метод может применяться для обогащения многих полезных ископаемых (угля, железных руд и др.).

7. Нейтронно-абсорбционный метод основан на различии минералов в способности ослаблять поток нейтронов в результате захвата их ядрами химических элементов. Метод может применяться для обогащения руд, содержащих бор.

Радиометрическое обогащение руд осуществляется на сепараторах, основными узлами которых являются: конвейер, подающий руду в зону измерения интенсивности излучения; электронная система, называемая радиометром, в котором под воздействием излучения появляются электрические импульсы; сортирующий механизм, разделяющий руду на концентрат и хвосты в зависимости от сигналов, поступающих с радиометра. При обогащении радиоактивных руд имеется, кроме того, источник облучения.

На рис. 56 показана схема ленточного радиометрического сепаратора с разделяющим механизмом шибераго типа [14]. Сепаратор состоит из ленточного конвейера 1, датчика 2, экрана 3, шибера 4, электромагнита 5 и радиометра 6.

Исходная руда подается на ленточный конвейер и монослоем перемещается к разделяющему шиберному механизму. При помощи радиометра, датчик которого помещен в концевом барабане, регистрируется интенсивность гамма-излучения руды. При повышенной интенсивности гамма-излучения кусков руды радиометр через контакты К реле Рс подает ток на обмотку электромагнита. Сердечник электромагнита втягивается и с помощью рычага поворачивает шибер так, чтобы был открыт приемник для концентрата.

Пустая порода, интенсивность гамма-излучения которой низкая, направляется в приемник для хвостов, который в обычном состоянии открыт.

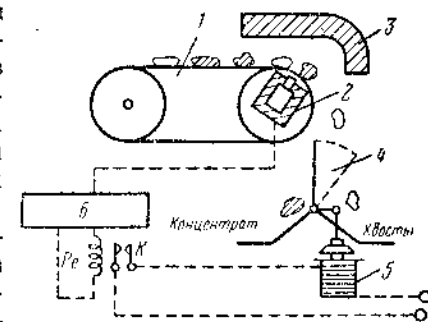


Рис. 56. Схема ленточного радиометрического сепаратора

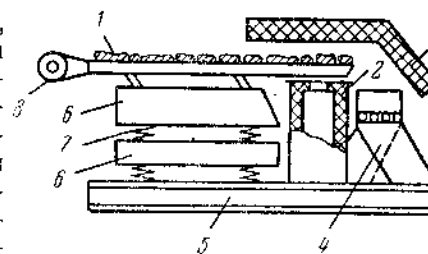


Рис. 57. Схема вибрационного радиометрического сепаратора

Схема вибрационного радиометрического сепаратора с шиберным разделяющим механизмом показана на рис. 57.

Сепаратор состоит из многоканального виброконвейера 1, датчика 2, экрана 3, шиберного разделяющего механизма 4 с разводящими желобами, рамы 5, инертной массы 6 для гашения вибраций, пружин 7 и вибратора 8. Этот сепаратор отличается от ленточного тем, что перемещение руды к датчику и разделяющему механизму осуществляется металлическим вибрационным конвейером, имеющим несколько параллельных желобов. Благодаря наличию желобов куски движутся по вибрационному конвейеру несколькими потоками. Каждый желоб в конце вибрационного конвейера оборудован индивидуальным датчиком и разделяющим механизмом. Разделяющий механизм состоит из шибера и электромагнитного привода. Датчики подключены к многоканальному радиометру, который управляет работой всех разделяющих механизмов. Многоканальные вибрационные радиометрические сепараторы имеют более высокую производительность по сравнению с ленточными сепараторами.

Преимуществом процесса радиометрической сепарации является большая селективность разделения урансодержащих минералов, независимо от того, какие другие физические свойства проявляются в этих минералах. Однако при помощи радиометрической сепарации могут разделяться только крупные куски руды (крупнее 25 мм), так как процесс разделения происходит эффективно только в том случае если измеряется радиоактивность небольшого числа кусков руды (лучше одного куска). При сепарации более мелкой руды производительность радиометрических сепараторов резко падает.

Перед обогащением материал обычно классифицируется на узкие классы крупности, например +150; —150+75; —75+50; —50+25; —25 мм. Каждый класс обогащается отдельно. Материал мельче нижнего предела крупности направляют на обогащение другими методами. Недостатком процесса радиометрической сепарации является также зависимость ее результатов от постороннего радиоактивного излучения, не связанного с радиоактивностью обогащаемой руды. Поэтому датчики уровня радиоактивности руды защищают специальными экранами.

§ 36. Обогащение по различию в коэффициентах трения и форме зерен

Если поместить на наклонную плоскость два минеральных зерна, одно из которых имеет гладкую, а другое шероховатую поверхность, то первое зерно, имея меньший по величине коэффициент трения, будет перемещаться с большей скоростью, и сойдя с наклонной плоскости, отлетит дальше, чем зерно с шероховатой поверхностью. Разница в скорости движения и траекториях полета зерен после отрыва их от наклонной плоскости

еще более усилится в том случае, если зерно с гладкой поверхностью будет иметь округлую, а зерно с шероховатой поверхностью пластинчатую форму. Зерно округлой формы будет катиться, преодолевая сопротивление трения качения, а зерно пластинчатой формы будет скользить, преодолевая большее по величине сопротивление скольжения. Углы наклона плоскости, при которых начинается движение частиц минералов разной формы, приведены в табл. 13 (плоскость покрыта резиной).

Таблица 13
Углы наклона плоскости, покрытой резиной, при которых начинается движение частиц минералов разной формы

Минерал	Угол наклона плоскости φ , градус	
	сферические частицы	пластинчатые частицы
Вольфрамит	28—36	44—47
Гранат	26—32	42—46
Касситерит	25—29	42—44
Магнетит	24—27	40—42
Кварц	19—28	28—41
Золото	36—39	41—57

Скорость движения частиц по наклонной плоскости зависит от состояния поверхности самих частиц, их формы, влажности, плотности, крупности, свойства поверхности, по которой они перемещаются и характера движения (качение или скольжение). Основным параметром, определяющим движение минеральных частиц по наклонной плоскости, является коэффициент трения. Коэффициенты трения скольжения частиц различных минералов в воздушной среде приведены в табл. 14.

Таблица 14
Коэффициенты трения скольжения частиц различных минералов в воздушной среде

Минерал	Материал наклонной плоскости			
	железо	стекло	дерево	линолеум
Куприт	0,53	0,46	0,67	0,73
Шеелит	0,53	0,51	0,70	0,71
Гематит	0,54	0,47	0,67	0,74
Квари	0,37	0,72	0,75	0,78
Антрацит	0,42	0,49	0,61	0,65
Асбест	0,75	—	—	—

Различие в скоростях движения минеральных зерен по наклонной поверхности, определяемое величиной коэффициентов трения, используют для их разделения в воздушной или водной среде.

Перемещение минеральных зерен может происходить под действием сил тяжести, если поверхность наклонная, под действием

центробежных сил при движении по горизонтальной плоскости вращающегося диска, а также под комбинированным действием сил тяжести и центробежных сил. В соответствии с этим различают аппараты для обогащения по трению с наклонной плоскостью, центробежные сепараторы с горизонтальной плоскостью и винтовые сепараторы с наклонными желобами, расположенными по спирали.

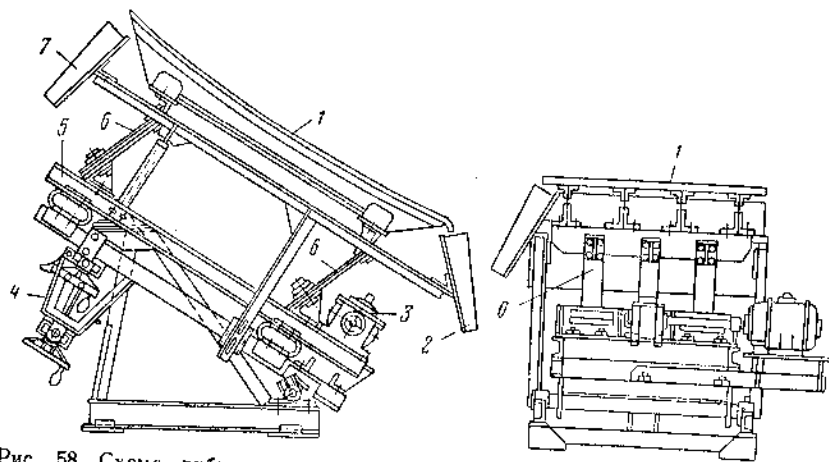


Рис. 58. Схема вибрационного сепаратора для обогащения руды по трению

Равнодействующая сил F , под влиянием которых происходит движение частицы по наклонной плоскости, определяется уравнением

$$F = mg(\sin \alpha - f \cos \alpha), \quad (87)$$

а скорость v движения частицы по наклонной плоскости — уравнением

$$v = \sqrt{2lg(\sin \alpha - f \cos \alpha)}, \quad (88)$$

где m — масса частицы;
 g — ускорение свободного падения;
 α — угол наклона плоскости;
 f — коэффициент трения, равный $\operatorname{tg} \varphi$;
 φ — угол трения.

На рис. 58 показана схема вибрационного сепаратора для обогащения полезных ископаемых, в котором используются различия в коэффициентах трения и форме зерен. Сепаратор состоит из наклонной деки 1, установленной на пружинных опорах 6, желобов 2 и 7 для приема продуктов разделения, вибратора 3, устройства 4 для изменения наклона деки и рамы 5.

Сухой измельченный материал подается на вибрирующую деку ниже ее середины. При вибрации деки округлые зерна с малым коэффициентом трения скатываются к нижнему концу

деки и разгружаются в желоб 2. Плоские частицы с большим коэффициентом трения перемещаются по деке вверх и разгружаются в желоб 7. Наклон деки регулируется в продольном (в пределах $20-50^\circ$) и поперечном (в пределах $0-10^\circ$) направлениях. Число вибраций деки колеблется от 2000 до 4000 в минуту. Вибрационные сепараторы применяются для разделения абразивных порошкообразных материалов.

На рис. 59 показан винтовой сепаратор, применяемый для сухого обогащения асбестовых руд, слюды и других материалов. Сепаратор состоит из наклонного винтового желоба 1, укрепленного на вертикальной стойке 2. Загрузка материала производится сверху. Двигаясь по винтовой поверхности, материал разделяется так, что округлые зерна под действием силы тяжести и центробежной силы постепенно удаляются от вертикальной оси сепаратора и перекачиваются во внешний желоб, расположенный параллельно с основным желобом. Плоские зерна скользят вниз по основному желобу и разгружаются вблизи оси сепаратора. Для увеличения производительности сепаратора его снабжают двумя или тремя основными желобами, загрузка которых производится отдельно.

Основные показатели винтового сепаратора: радиус средней винтовой линии 330 мм; ширина желоба 160 мм; длина желоба 1,8 м; угол наклона желоба 35° . При обогащении слюды производительность сепаратора составила 9 т/ч, извлечение слюды 95,2%.

§ 37. Обогащение на жировых поверхностях

Метод обогащения на жировых поверхностях основан на избирательной способности некоторых минералов удерживаться липкими (жировыми) поверхностями. Применяется он главным образом при обогащении алмазов. При перемещении пульпы, содержащей алмазы, по поверхности, смазанной жировыми веществами, гидрофильные минералы (кварц, кальцит и др.) не прилипают к ней и сносятся потоком воды, в то время как

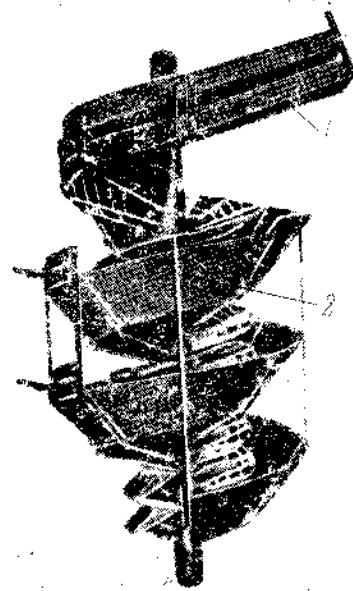


Рис. 59. Винтовой сепаратор

гидрофобные алмазы прочно прилипают к жировой поверхности и удерживаются на ней. Процесс обогащения на липких поверхностях обеспечивает высокое извлечение алмазов (99—99,8%).

Необходимыми условиями получения высокого извлечения алмазов при этом процессе являются равномерная подача питания на жировую поверхность и правильный подбор состава жиров. Состав жиров должен обеспечить оптимальную густоту жирового покрытия при данной температуре пульпы. Толщина жирового покрытия достигает 12—15 мм. Извлечение алмазов жирового покрытия зависит от свойств их поверхности и поверхности минералов пустой породы. Существуют разновидности алмазов (так называе-

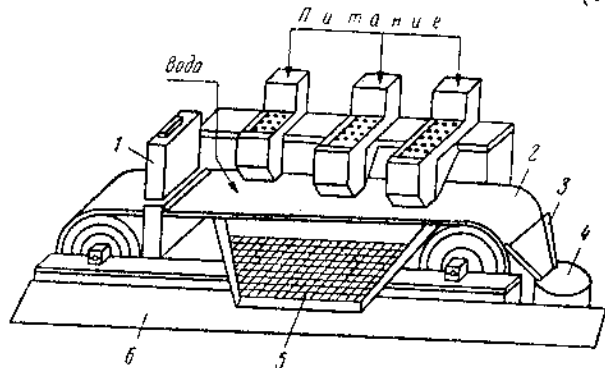


Рис. 60. Схема ленточного жирового стола

мые упорные алмазы), которые смачиваются водой и не прилипают к жировой поверхности. Эти алмазы встречаются главным образом в аллювиальных месторождениях. Смачивание их водой обусловлено наличием на поверхности алмаза смачиваемой тонкой пленки солей (например, окиси железа, хлористого натрия и др.). Такие разновидности алмазов подлежат предварительной обработке специальными реагентами (автол, олеиновая кислота и др.), позволяющими придать их поверхности гидрофобные свойства.

Для успешного разделения необходимо, чтобы гидрофобизирующий реагент был нанесен на поверхность алмазов в виде тонкой пленки. Жировая мазь должна быть вязкой, пластичной, не размываться водой и иметь прочность, достаточную для удерживания прилипших частиц.

Аппараты, предназначенные для извлечения алмазов на липких поверхностях, называются жировыми столами.

Процесс обогащения на жировых столах может осуществляться с периодическим и непрерывным съемом алмазов.

На рис. 60 показана схема ленточного жирового стола с непрерывным съемом алмазов. Стол представляет собой бесконечную резиновую ленту 2 шириной 1000 мм с жировым покрытием, натянутую на двух барабанах, расположенных на расстоянии

2000 мм друг от друга. Лента установлена под углом 12° к горизонтальной плоскости. На переднем конце ленты устанавливается скребок 3 для снятия верхнего слоя жира с алмазами, а на заднем конце — вибрационный питатель 1 для жировой массы. Пульпа подается сверху и движется перпендикулярно направлению движения ленты. Алмазы прилипают к жиру и выносятся лентой к скребку, а минералы пустой породы смываются водой в лоток 5 и удаляются в отвал. Снятый скребком верхний слой жира с алмазами попадает в приемник 4 на вставленную в него сетку. Приемник с сеткой подогревается электрическим подогревателем. Алмазы и прилипшие к жировой поверхности сопутствующие минералы освобождаются от растопленного жира и остаются на сетке, которая периодически заменяется другой. Весь стол, включая раму 6, совершает возвратно-поступательное движение в направлении, перпендикулярном движению ленты. Скорость движения ленты 0,2—0,3 м/мин.

§ 38. Избирательное дробление, измельчение и декрипитация

Процесс обогащения этими методами основан на избирательном разрушении минералов в результате их различной механической прочности при дроблении и измельчении или на свойствах минералов избирательно разрушаться (растрескиваться) при нагревании и последующем быстром охлаждении. Процесс разрушения в последнем случае называется декрипитацией.

Разрушение руды при декрипитации происходит в результате различной теплопроводности и коэффициентов расширения при нагревании и охлаждении, вызывающих сильные напряжения, приводящие к растрескиванию минералов, а также из-за наличия в минералах кристаллической воды, которая при нагревании вызывает разрушение кристаллов.

После дробления, измельчения и декрипитации различные минералы приобретают определенную крупность и форму зерен. Дальнейшее их обогащение может осуществляться грохочением, гравитацией или другими методами.

Избирательное дробление и измельчение руды производят в дробилках (молотковых и др.), стержневых, шаровых, рудно-галечных мельницах и мельницах самоизмельчения.

Промышленное применение избирательное дробление и измельчение получили при обогащении строительных материалов, горючих сланцев и других неметаллических полезных ископаемых.

Областью применения декрипитации может быть обогащение баритовых, флюоритовых и сподуменовых руд. Однако практически этот метод используют при обогащении сподуменовых руд.

Перед нагреванием руду дробят до крупности 20—50 мм и с помощью грохочения удаляют класс крупности — 0,2 мм. Оставшийся продукт нагревают во вращающейся барабанной печи до

1000--1200°С и охлаждают. Затем руду измельчают в шаровой мельнице с резиновой футеровкой, в результате чего минерал сподумей превращается в порошок. После мельницы руду подвергают грохочению для отделения мелкого сподуменового концентрата от крупных частиц пустой породы.

§ 39. Гидрометаллургические процессы обогащения

В последние годы для обогащения сложных по составу руд и доводки некоторых концентратов и промпродуктов начинают широко применяться комбинированные технологические схемы, в которых наряду с механическими операциями обогащения используются гидрометаллургические процессы.

Гидрометаллургические процессы основаны на селективном растворении ценных компонентов руды или их вредных примесей водными растворами химических реагентов. Иногда в процессе растворения образуются другие химические соединения, легко отделяемые от пустой породы.

В отдельных случаях гидрометаллургические процессы применяются для разделения комплекса полезных минералов, один из которых существенно видоизменяется при химической обработке (превращаются в другие химические соединения), а другие остаются в неизменной минеральной форме.

Важное значение химическое обогащение приобретает при доводке труднообогатимых промпродуктов и некондиционных концентратов, которые не могут быть эффективно доработаны механическими методами обогащения или получение из них кондиционных концентратов связано с большими потерями ценных минералов.

С развитием химических методов обогащения тесно связана проблема комплексного извлечения полезных компонентов, а также перспектива промышленного использования бедных руд, обогащение которых обычными методами экономически не оправдано.

Основными операциями гидрометаллургического процесса являются следующие: измельчение исходного материала до оптимальной крупности, определяемой экспериментально для каждого типа руд (обычно в пределах 0,074—0,2 мм), выщелачивание минералов, отделение раствора от твердого вещества, разделение и осаждение полезных металлов, сушка и обжиг полученных концентратов.

Измельчение руды производится для лучшего доступа растворителя к рудным минералам и ускорения процесса растворения в результате увеличения активной поверхности минералов.

Во многих случаях отсутствует необходимость в измельчении исходного материала, и эта операция из технологического процесса исключается. Не всегда также применяется обжиг полученных концентратов.

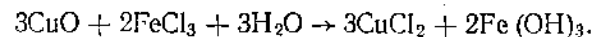
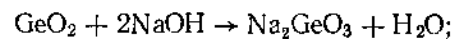
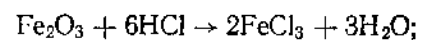
Наиболее важной операцией гидрометаллургического процесса является выщелачивание минералов, при котором полезные компоненты переходят в раствор.

При растворении минералы претерпевают существенные изменения, которые в ряде случаев можно наблюдать визуально, например по изменению окраски раствора. Это связано со свойствами атомов и ионов растворяемого минерала, которые при растворении освобождаются от окружающих их в кристалле атомов или ионов и соединяются с молекулами растворителя.

По характеру взаимодействия минерала и растворителя различают следующие виды процессов растворения [15]: 1) процессы простого или физического растворения и 2) процессы химического растворения, обусловленные химическим взаимодействием между растворяемым минералом и растворителем. Химическое растворение может происходить на основе обменных реакций, окислительно-восстановительных процессов и с образованием комплексных соединений.

Примером простого растворения может служить растворение кристаллов NaCl в воде. Чтобы перевести кристалл NaCl в раствор, необходимо разрушить его кристаллическую решетку, т. е. затратить энергию, равную энергии кристаллической решетки. Для ионных кристаллов NaCl эта энергия равна 183 ккал/моль. Если поместить такой кристалл в воду, то энергия взаимодействия ионов в поверхностных слоях решетки уменьшится в 81 раз (на величину диэлектрической постоянной воды) и будет равна всего 2,2 ккал/моль. Это воздействие полярных молекул воды совместно с энергией теплового движения ионов в решетке способствует ее разрушению, в результате чего кристаллы NaCl растворяются в воде.

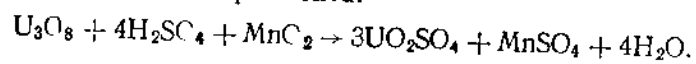
При химическом растворении на основе обменных реакций происходит образование легко растворимых сульфатов, хлоридов, нитратов и других солей в результате взаимодействия окислов металлов с кислотами, щелочами или растворимыми солями. Например:



На основе обменных реакций происходит также растворение сульфидов в растворах кислот и солей, выщелачивание минералов вольфрама растворами соды или едкого натра и многие другие реакции, применяемые при переработке руд и концентратов.

Растворение с использованием окислительно-восстановительных реакций может происходить при окислении катиона металла до состояния высшей валентности, как это имеет место,

например, при выщелачивании урановой смолки из руд в присутствии окислителя пиролюзита:

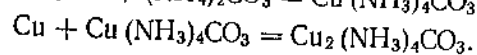
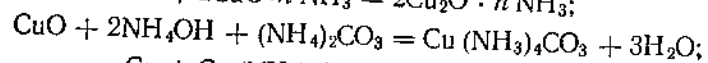
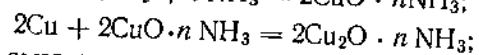
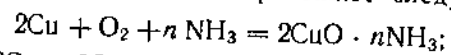


Уран в данном случае извлекается в раствор в форме уранил-иона, соли которого характеризуются высокой растворимостью.

Известны также примеры, когда растворение минералов связано с окислением анионов (превращение сульфидов в сульфаты при автоклавном выщелачивании) или окислением катионов и анионов одновременно (цианирование золото-сурьмянистых концентратов).

Примером растворения с образованием комплексных соединений может служить аммиачное выщелачивание из руд самородной меди и ее окислов. Растворителями в этом случае являются растворы свободного аммиака, аммонийных солей и комплексной углеаммонийной соли окиси меди.

В процессе выщелачивания протекают следующие реакции:



Результаты выщелачивания отдельных компонентов зависят от вещественного состава руды, температуры раствора, концентрации растворителя, продолжительности растворения и других факторов.

Для выщелачивания минералов применяются растворы углекислого натрия, углекислого аммония, аммиака, цианистого калия, серной, соляной и азотной кислот и др.

Концентрация растворителей изменяется от 0,02% KCN для выщелачивания золота до 30% HCl для разложения шеелитовых концентратов или до 94% H₂SO₄ для разложения ильменитовых, перовскитовых и ниобиевых концентратов.

Выщелачивание может осуществляться либо в результате просачивания растворителя через слой руды, находящийся в покое, либо механическим перемешиванием измельченной руды с растворителем. Первый способ выщелачивания является наиболее дешевым и применяется для кускового материала (более 3 мм), так как при более мелком материале скорость просачивания незначительна, и эффективность выщелачивания снижается. Выщелачивание с помощью просачивания растворителя применяется для извлечения меди из заброшенных горных выработок и отвалов некондиционных руд, а также для извлечения меди из кускового материала в чанах (серноокислотное выщелачивание медных руд).

Широкое распространение получило выщелачивание с механическим перемешиванием пульпы в специальных чанах, однако применяется этот метод только для измельченного материала крупностью менее 0,3 мм.

Отделение раствора от твердого вещества производится сгущением или фильтрованием. Сгущение пульпы осуществляется в прудах, чанах и сгустителях. Для фильтрования применяются вакуум-фильтры различных конструкций.

Выделение металлов и их соединений из раствора производится разнообразными методами. Например, в медной промышленности применяют электролиз и цементацию меди железной и чугунной стружкой или железным скрапом.

В технологии урановых, золотосодержащих, вольфрамовых и молибденовых руд широкое распространение получили экстракционные и сорбционные методы извлечения металлов из растворов.

Методы жидкостной экстракции основаны на том, что при контактировании водного раствора, содержащего ценный компонент, с нерастворимыми в воде органическими жидкостями (экстрагентами) определенная часть этого компонента переходит (экстрагируется) в органическую жидкость. Обработка раствора экстрагентом может производиться неоднократно, в результате чего достигается высокое извлечение полезного компонента.

Насыщенный полезным компонентом экстрагент обрабатывается водным раствором какого-либо реагента, и полезный компонент вновь переводится в водную фазу. Полученный таким образом новый раствор отличается от исходного тем, что он значительно меньше содержит вредных примесей и более обогащен извлекаемым полезным компонентом.

Метод сорбционного извлечения металлов из растворов основан на способности синтетических ионнообменных смол и некоторых природных и искусственных сорбентов поглощать (сорбировать) из пропускаемого через них раствора ионы металла, отдавая в раствор эквивалентное количество других ионов. Сорбция осуществляется последовательным пропусканием раствора через несколько колонн, наполненных зернистым сорбентом. После насыщения сорбента извлекаемым металлом он подвергается регенерации пропусканием через него раствора с высокой концентрацией тех ионов, которые были замещены в сорбенте в процессе сорбции, т. е. раствора кислоты, щелочи или соли. Извлекаемый металл переходит в новый раствор, который отличается от исходного раствора большей концентрацией этого металла и меньшим содержанием вредных примесей.

Характеристика применяемых экстрагентов и сорбентов приведена в специальной литературе [15].

Окончательное выделение извлекаемых металлов из полученных экстракционным и сорбционным методами растворов осуществляется осаждением, фильтрацией, выпариванием и т. д.

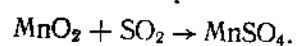
Гидрометаллургические процессы могут быть применены как для доводки некондиционных богатых концентратов, так и для переработки промежуточных низкосортных продуктов обогащения и бедных шламов.

При гидрометаллургической доводке шеелит-молибденовых концентратов удаляются апатит, кальцит и повеллит, при этом в раствор переходит от 0,5 до 2% вольфрама [6]. Выщелачивание примесей производится 3—6%-ным раствором соляной кислоты в две стадии. Продолжительность первой обработки концентрата кислотой 30 мин, второй — 60 мин. После выщелачивания примесей концентрат промывают водой, фильтруют и сушат.

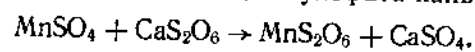
Комбинированные схемы обогащения, включающие химические процессы (цианирование, хлорирование, сернокислотное выщелачивание), применяют в технологии переработки золото-содержащих руд. Растворение золота, содержащегося в гравитационных концентратах, производится в слабых растворах цианидов натрия, кальция или калия. Продолжительность растворения золота зависит от концентрации цианида, размера и формы частиц золота, состояния их поверхности, температуры пульпы.

При обогащении марганцевых руд химические процессы могут использоваться для обработки шламистых продуктов с содержанием марганца 10—20%. По дитионатному способу обработку такого сырья необходимо проводить в пульпе, приготовленной на растворе дитионата кальция CaS_2O_6 . Для выщелачивания марганца из раствора используется сернистый газ SO_2 .

В процессе выщелачивания протекают следующие реакции:

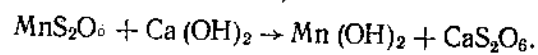


Сульфат закиси марганца, взаимодействуя с CaS_2O_6 , образует дитионат закиси марганца и осадок сульфата кальция:



Для полного удаления вредных примесей (фосфора, железа и др.) и уменьшения потерь марганца с осадком производится аэрация пульпы воздухом, после чего осадок сульфата кальция вместе с неразложившимся рудным остатком отфильтровывают и промывают.

Осаждение гидроокиси марганца из оставшегося раствора производят известковой кашицей;



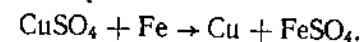
Расход кашицы в пересчете на 100% CaO составляет 1,05 кг на 1 кг марганца в растворе.

Полученный после фильтрования кек подвергается окускованию и подшихтовывается к фосфористым концентратам механического обогащения.

В СССР дитионатный процесс был успешно применен в полупромышленном масштабе для переработки марганцевых шламов обогатительных фабрик.

Установлено, что дитионатным способом могут успешно перерабатываться марганцевые шламы с получением высокосортных бесфосфористых концентратов при извлечении в них марганца 82,7—84,4%.

Химическое обогащение с растворением полезных минералов применяется для извлечения меди из бедных руд, теряемых при отработке месторождения (Дегтярский рудник). После выемки основных запасов рудное тело орошается раствором серной кислоты. В результате реакции обмена образуется раствор сульфата меди (CuSO_4), из которого в цементационной ванне получают металлическую медь по реакции.



Процесс растворения меди значительно ускоряется при наличии в растворе некоторых микроорганизмов (бактерий).

Широкое распространение получили гидрометаллургические процессы в технологии производства алюминия. В СССР разработан и освоен промышленностью способ комплексной переработки нефелинов с получением глинозема, солей щелочных металлов и портланд-цемента. Этот способ основан на спекании нефелина с известняком, выщелачивании из спека алюмината натрия и использовании твердого остатка от выщелачивания для производства цемента.

Комбинированные технологические схемы обогащения с использованием химических процессов применяются при извлечении из руд молибдена, свинца, ниобия, железа и других металлов.

Вовлечение в переработку все более бедных руд и необходимость комплексного использования всех полезных компонентов руды предопределяют перспективу широкого внедрения химических процессов в практику обогащения различных полезных ископаемых.

Глава XI

Контроль и регулирование технологических процессов

§ 40. Общие положения

Целью автоматизации процессов электрической и магнитной сепарации является увеличение производительности оборудования, повышение качества концентратов, снижение потерь полезных компонентов, уменьшение количества обслуживающего персонала, улучшение условий и повышение безопасности труда.

Важной составной частью автоматического управления является автоматический контроль, так как для ведения любого технологического процесса в первую очередь необходимо иметь информацию о его протекании. Контролируемые параметры рассматриваемых процессов подразделяются на электрические (ток, напряжение) и технологические (температура, расход материала, уровень).

При электрической сепарации контролируются напряжение на электродах, ток короны (у коронных сепараторов), расход материала (производительность сепараторов), его влажность и температура.

При сухой магнитной сепарации контролируются расход продуктов и намагничивающий ток (у сепараторов с электромагнитными системами).

При мокрой магнитной сепарации контролируются расход и плотность пульпы, уровень пульпы в ваннах сепараторов и намагничивающий ток.

В отдельных точках технологической схемы необходимо контролировать качество продуктов обогащения, т. е. измерять содержание полезного компонента и основных примесей.

Измерение температуры и уровня осуществляется общепромышленными приборами, приведенными в учебной и справочной литературе [16, 18]. Измерительная аппаратура для контроля других технологических параметров должна удовлетворять особым требованиям, связанным со спецификой технологии обогащения и свойствами сырья.

Например, измерение влажности материала при электрической сепарации производят влагомерами, работа которых основана на зависимости электрических свойств материала от влажности, поскольку в данном случае важно знать, насколько влажность изменяет поверхностную электропроводность частиц.

Ниже изложен принцип действия приборов, которые находят применение при электрическом и магнитном обогащении, а также некоторые схемы автоматического контроля и регулирования процессов сепарации [19—21].

§ 41. Приборы для измерения расхода сыпучих материалов

Для контроля расхода сыпучих материалов используются конвейерные весы, принцип действия которых основан на взвешивании участка ленты конвейера с находящимся на нем материалом.

Грузоподъемное устройство весов выполняется в виде рамы 1 (рис. 61) с установленными на ней роликами 2, причем одна сторона рамы закреплена шарнирно, а другая связана с силоизмерительным преобразователем 3. Конвейерная лента 4, перемещающаяся по роликам 5, опирается на ролики рамы своим

рабочим участком длиной L . Нагрузка на 1 м конвейерной ленты

$$g(t) = \frac{M(t)}{L}, \quad (89)$$

где $M(t)$ — масса материала, находящегося на рабочем участке.

С одним из роликов 5 связан датчик скорости ленты 6. Сигналы от датчика 6 и силоизмерительного преобразователя 3 поступают на вычислительное устройство 7 и далее на вторичные приборы 8 и 9 мгновенной и суммарной

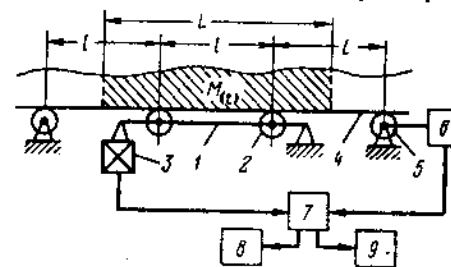


Рис. 61. Схема ленточных конвейерных весов

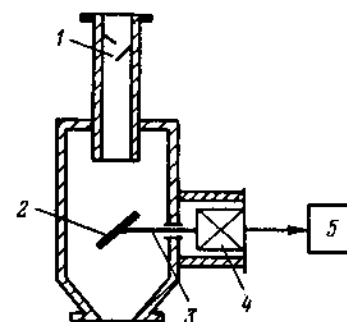


Рис. 62. Схема весоизмерителя для сыпучих материалов

производительности. Мгновенная производительность определяется как проведение $g(t)$ на скорость ленты $v(t)$:

$$G(t) = kg(t) \cdot v(t), \quad (90)$$

где k — постоянный коэффициент, учитывающий передаточные отношения весовой системы.

При непрерывном взвешивании суммарная масса прошедшего через весы материала находится интегрированием мгновенной производительности $G(t)$ по времени t :

$$G = \int_{t_1}^{t_2} G(t) dt, \quad (91)$$

где $t_2 - t_1$ — интервал времени, за который определяется производительность.

В некоторых конструкциях весов (ленточных весоизмерителях) рабочий участок выполняется в виде самостоятельного короткого конвейера, установленного на грузоприемной раме.

Отечественной промышленностью выпускаются конвейерные весы и ленточные высокоизмерители на производительности от 0,3 до 4500 т/ч с точностью взвешивания от $\pm 0,5$ до $\pm 2,0\%$.

Принцип действия весоизмерителя для сыпучих материалов, показанного на рис. 62, основан на существовании зависимости между расходом материала по массе $G(t)$ и усилием, восприни-

маемым чувствительным элементом от потока падающего с постоянной высоты материала $P(t)$:

$$G(t) = f[P(t)]. \quad (92)$$

Поток материала, проходя через устройство 1, предназначенное для гашения кинетической энергии потока, попадает на наклонную грузоприемную площадку 2. Последняя с помощью рычага 3 крепится к силоизмерительному преобразователю 4, соединенному со вторичным прибором 5.

Рассмотренный весоизмеритель обеспечивает точность $\pm 2,5\%$ и может использоваться для измерения расхода сыпучих материалов с температурой до 250°C .

§ 42. Приборы для измерения плотности пульпы

Приборы для измерения плотности пульпы (плотномеры) по принципу действия разделяются на следующие группы: поплавковые, весовые, гидростатические и радиоактивные.

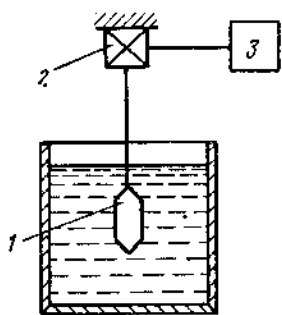


Рис. 63. Схема плотномера с утопленным поплавком

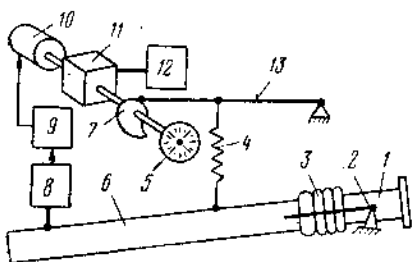


Рис. 64. Схема компенсационного датчика весового плотномера

На рис. 64 показана схема компенсационного датчика весового плотномера.

Поток пульпы из патрубка 1 подается в трубу 6, соединен-

ную с патрубком при помощи гибкого шланга 3, откуда направляется в слив. Труба 6 подвешена на пружине 4 и закреплена на шарнире 2. При изменении плотности пульпы труба 6 отклоняется от своего нейтрального положения. Это отклонение воспринимается датчиком перемещения 8. Выходной сигнал датчика перемещения поступает на усилитель 9, управляющий реверсивным электродвигателем 10. Последний, вращая через редуктор 11 лекало 7, перемещает рычаг 12 до тех пор, пока труба 6 не возвратится в исходное положение и на выходе датчика перемещения 8 не исчезнет сигнал разбаланса. При этом вращающаяся шкала 5 и чувствительные элемен-

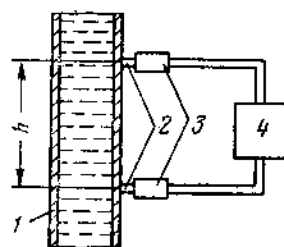


Рис. 65. Схема гидростатического плотномера с непосредственным измерением давления столба жидкости

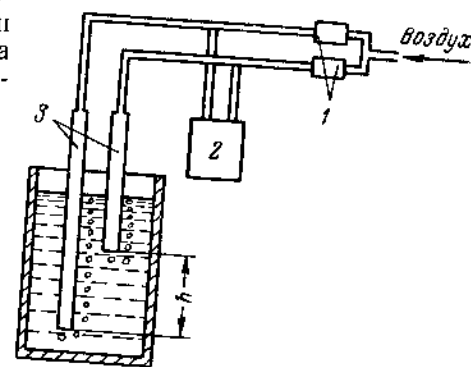


Рис. 66. Схема гидростатического плотномера с подачей воздуха

ты датчиков дистанционной передачи показаний займут положение, соответствующее новому значению плотности. Кроме того, угол поворота шкалы может быть преобразован в электрический или пневматический сигнал и передан на регистрирующий прибор 12.

Датчик выпускается промышленностью серийно. Основная погрешность датчика не превышает $\pm 1,5\%$.

В гидростатических плотномерах о плотности судят по давлению столба жидкости P постоянной высоты h :

$$P = \rho hg. \quad (94)$$

Причем давление столба жидкости может измеряться непосредственно (рис. 65) либо продувкой через жидкость сжатого газа (рис. 66).

В первом случае (см. рис. 65) участок трубопровода 1, на котором устанавливаются отборы давления 2, выбирается вертикальным. Датчик перепада давлений (дифманометр) 4 подсоединяется к отборам через разделительные устройства 3, предотвращающие попадание в дифманометр твердых частиц.

Плотномеры второго типа (см. рис. 66) применяются в тех случаях, когда пульпа находится под атмосферным давлением.

Сжатый воздух через устройства 1, обеспечивающие постоянный расход, подается в две пьезотрубки 3, опущенные на разную глубину. К пьезотрубкам подключен дифманометр 2. Изменяемая им разность давлений прямо пропорциональна плотности пульпы, так как давление столба жидкости, преодолеваемое пузырьками воздуха, зависит от плотности пульпы и глубины погружения пьезотрубок. Наличие двух трубок исключает влияние на показание прибора колебаний уровня пульпы.

Точность гидростатических плотномеров $\pm (0,1 \div 4) \%$.

Работа радиоактивных плотномеров основана на законе ослабления параллельного пучка гамма-квантов при прохождении через слой пульпы.

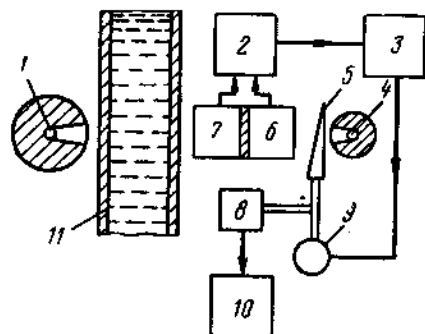


Рис. 67. Принципиальная схема радиоактивного компенсационного плотмера

Принципиальная схема радиоактивного компенсационного плотмера показана на рис. 67. Поток гамма-квантов от основного источника 1, проходя стенки трубопровода 11 и контролируемую среду, попадает на приемник 7. Излучение от компенсационного источника 4, предназначенного для повышения точности измерения плотности, через компенсационный клин 5 попадает на приемник 6. При изменении плотности пульпы изменяется интенсивность излучения, воспринимаемая приемником 7, и на выходе измерительной схемы 2 появляется сигнал разбаланса.

Усиленный электронным усилителем 3 сигнал подается на реверсивный двигатель 9. Последний перемещает компенсационный клин 5 до тех пор, пока поглощение им гамма-излучения не сравняется с поглощением в контролируемой среде и сигнал разбаланса исчезнет. С клином кинематически связан датчик дистанционной передачи показаний 8, подключенный ко вторичному прибору 10.

Погрешность измерения радиоактивных плотномеров составляет $\pm (2 \div 5) \%$.

§ 43. Приборы для измерения расхода пульпы

При контроле расхода пульпы, транспортируемой по трубопроводам, измеряется физическая величина, зависящая от средней скорости потока. Объемный расход пульпы определяется по соотношению

$$Q = Sv \quad (95)$$

где S — поперечное сечение трубопровода;
 v — средняя скорость потока.

Расход пульпы по массе

$$G = Q\rho, \quad (96)$$

где ρ — плотность пульпы.

Объемный расход пульпы измеряется расходомерами: индукционными, обтекания и переменного уровня.

Индукционные расходомеры (рис. 68) измеряют расход жидкости по величине электродвижущей силы E , которая наводится в потоке жидкости, протекающей в магнитном поле, направленном перпендикулярно оси трубопровода:

$$E = Bdv, \quad (97)$$

где B — индукция магнитного поля;

d — диаметр трубопровода;

v — средняя по сечению трубопровода скорость пульпы.

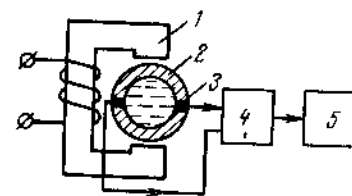


Рис. 68. Схема индукционного расходомера пульпы

Индукционные расходомеры применяются для измерения расхода пульпы с электропроводностью не ниже $1 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$.

Электромагнитное поле внутри участка трубы 2 (см. рис. 68), выполненной из немагнитного материала и покрытой электроизоляционным слоем, создается электромагнитом 1. Образующаяся в жидкости э. д. с. снимается с электродов 3, расположенных диаметрально противоположно в одном сечении, и подается на измерительный усилитель 4, связанный со вторичным прибором 5.

Погрешность индукционных расходомеров $\pm (1 \div 1,6) \%$ [18].

Принцип действия расходомеров обтекания основан на измерении силы P , действующей на находящееся в потоке тело:

$$P = kS \frac{v^2}{2} \rho, \quad (98)$$

где k — коэффициент потери напора;

S — гидродинамическое сечение тела;

V — скорость потока;

ρ — плотность пульпы.

Схема расходомера обтекания показана на рис. 69.

Помещенное в поток тело 2 с помощью рычажной системы 3, проходящей через мембрану 4, связано с силоизмерительным преобразователем 1. Выходной сигнал силоизмерительного преобразователя подается на вторичный прибор 5, шкала которого градуирована в единицах расхода.

Расходомеры обтекания обеспечивают точность измерения $\pm 1,5 \%$ [18].

В расходомерах переменного уровня о величине расхода судят по уровню в расходомерной емкости 1 (рис. 70), измеряемого с помощью датчика 2, подключенного к прибору 3.

В расходомерах с крупным отверстием истечения 4 (рис. 70) зависимость между объемным расходом Q и уровнем h определяется отношением

$$Q = \alpha S \sqrt{2gh}, \quad (99)$$

где α — коэффициент расхода, учитывающий потерю напора и степень сжатия струи, выходящей из отверстия; S — площадь отверстия.

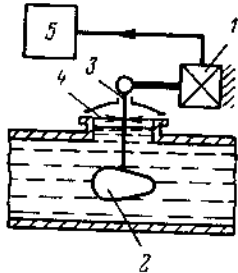


Рис. 69. Схема расходомера обтекания

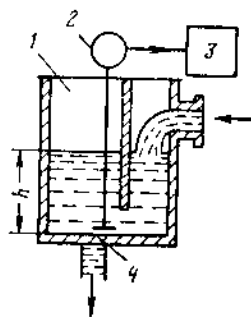


Рис. 70. Схема расходомера переменного уровня

Основным расчетным уравнением расходомеров истечения щелевидного типа (рис. 71) является

$$Q = ab \sqrt{2gh^3}. \quad (100)$$

где b — ширина водослива.

Обычно отверстие 4 (рис. 71) выполняется профилированным по высоте с таким расчетом, чтобы зависимость между расходом и уровнем была линейной. Этому условию удовлетворяет щель гиперболического профиля.

Основная погрешность измерения расходомеров переменного уровня составляет $\pm 3,5\%$ [18].

§ 44. Схемы автоматического контроля и регулирования

Схема автоматического контроля технологических параметров сухой магнитной и электрической сепарации показана на рис. 72.

Схема предусматривает измерение расходов подаваемого на сепаратор материала 1,2 и концентрата 5,6, температуры исход-

ного материала 3, содержания полезного компонента в концентрате 4 и отвальных хвостах 7. При сухой магнитной сепарации необходимость в измерении температуры материала отпадает.

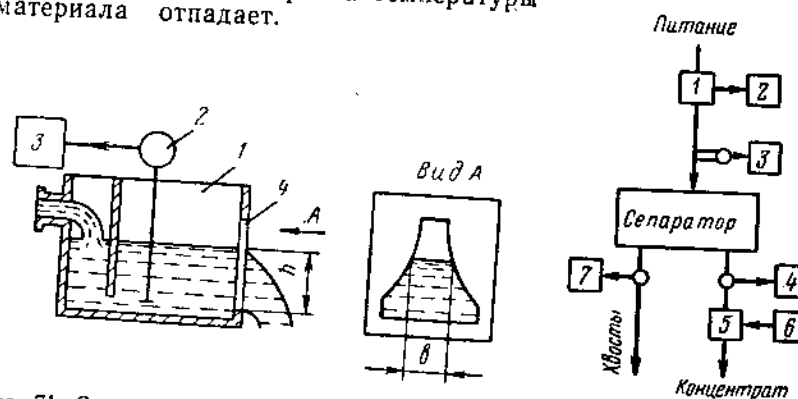


Рис. 71. Схема расходомера переменного уровня щелевидного типа (см. поз. 1-4 в описании рис. 70)

Рис. 72. Схема автоматического контроля процесса сухой магнитной и электрической сепарации

Схема автоматического контроля и регулирования мокрой магнитной сепарации (рис. 73) включает измерение расхода 10,11 и плотности 4, поступающей в сепаратор пульпы, содержа-

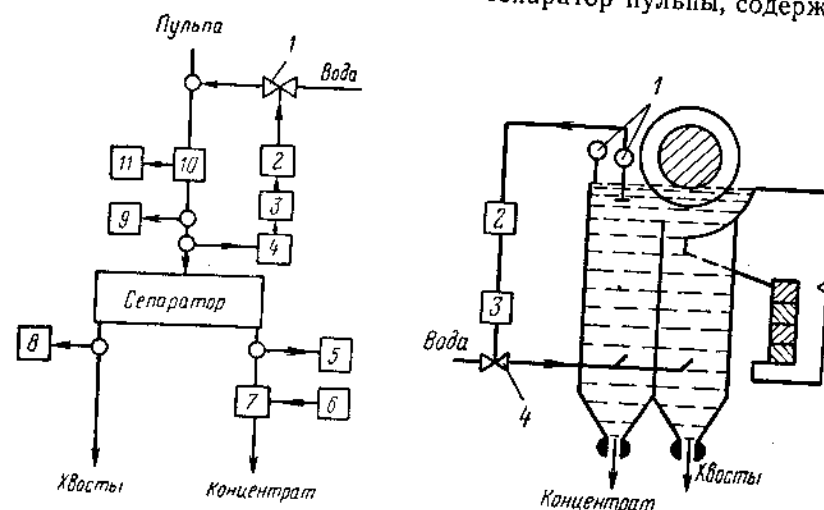


Рис. 73. Схема автоматического контроля и регулирования процесса мокрой магнитной сепарации

Рис. 74. Схема автоматического регулирования уровня пульпы в ванне магнитного сепаратора

ния полезного компонента в исходном питании 9, концентрате 5 и отвальных хвостах 8, а также расхода твердого в пульпе после сепаратора 6, 7.

Со вторичным прибором плотмера 4 связан автоматический регулятор 3, управляющий при помощи исполнительного механизма 2 регулирующим органом 1 на линии подачи воды. Так обеспечивается автоматическое поддержание заданной плотности исходного питания.

При обогащении слабомагнитных руд на сепараторах с высокой напряженностью магнитного поля и разгрузкой продуктов

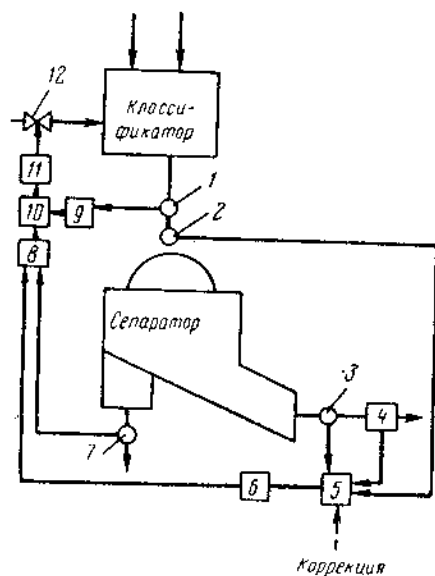


Рис. 75. Схема автоматического управления работой магнитных сепараторов

через насадки уровень пульпы в ванне поддерживается автоматически подачей воды в ванну сепаратора. Для этой цели (рис. 74) используется позиционный импульсный регулятор 2, получающий сигналы от датчиков уровня 1 и изменяющий положение регулирующего органа 4 посредством исполнительного механизма 3.

При обогащении магнитных пульп в магнитных конусах, требующих поддержания постоянной высоты слива, регулирование уровня достигается автоматическим изменением величины пескового отверстия.

Весьма перспективным является применение для управления процессом магнитной сепарации экстремальных систем, оптимизирующих показатель качества, учитывающий содержание полезного минерала в питании и продуктах обогащения.

На рис. 75 показана система автоматического управления работой магнитных сепараторов I стадии технологической схемы обогащения железных руд.

Выходными параметрами таких магнитных сепараторов является содержание железа в промпродукте и хвостах, а также величина выхода промпродукта. Достичь оптимального соотношения между содержанием железа в промпродукте и его выходом можно изменением плотности слива классификатора, влияющей на время сепарации.

Приведенная система включает контур регулирования плотности слива, состоящий из датчика плотности 1, вторичного при-

бора 9, автоматического регулятора 10 с задатчиком 8, соединенным с датчиком содержания железа в хвостах 7, исполнительного механизма 11 и регулирующего органа 12.

Сигналы от датчиков содержания железа в исходном питании 2, промпродукте 3 и от датчика расхода твердого в пульпе 4 поступают на вычислительное устройство 5. В нем производится вычисление критерия оценки эффективности работы магнитного сепаратора, отражающего ход процесса с технологической либо технико-экономической точек зрения.

Выход вычислительного устройства подключен к оптимизатору 6, изменяющему установку задатчика 8 системы регулирования плотности таким образом, чтобы обеспечить оптимальное соотношение между содержанием полезного компонента и его выходом.

Электрические и магнитные величины

Приложение I

Величина	Символ	Размерность в системах		Единица измерения и ее сокращенное значение в системах		Перевод значений
		СИ	СГС	СИ	СГС	
Ток	I	I	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-2}$	ампер (А)	—	—
Плотность электрического тока	δ	$L^{-2}I$	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-2}$	ампер на квадратный метр (А/м ²)	—	—
Электрический заряд	Q	TI	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$	кулон (Кл)	—	—
Поверхностная плотность электрического заряда	σ	$L^{-2}TI$	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$	кулон на квадратный метр (Кл/м ²)	—	—
Объемная плотность электрического заряда	ρ	$L^{-3}TI$	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$	кулон на кубический метр (Кл/м ³)	—	—

Электрический потенциал, разность электрических потенциалов	U	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$	вольт (В)	—	—
Электродвижущая сила	$E_{эдс}$	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$	вольт (В)	—	—
Напряженность электрического поля	E	$LMT^{-3}I^{-1}$	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$	вольт на метр (В/м)	—	—
Градиент напряженности электрического поля	$\text{grad } E$	$MT^{-3}I^{-1}$	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$	вольт на квадратный метр (В/м ²)	—	—
Электрическая емкость	C	$L^{-2}M^{-1}T^{-4}I^2$	L	фарادا (Ф)	Сантиметр (см)	$1 \text{ Ф} = 9 \cdot 10^{11} \text{ см}$
Электрическая проводимость	G	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	LT^{-1}	сименс (См)	—	—
Электрическое сопротивление	R	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	$L^{-1}T$	ом (Ом)	—	—
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	ϵ_a	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	1	фарادا на метр (Ф/м)	—	—
Абсолютная диэлектрическая восприимчивость	$\epsilon_{абс}$	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	1	фарาดา на метр (Ф/м)	—	—

Продолжение приложения 1

Величина	Символ	Размерность в системах		Единица измерения и ее сокращенное значение в системах		Перевод значений
		СИ	СГС	СИ	СГС	
Электрическая постоянная	ϵ_0	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	1	Фарада на метр (Ф/м)	—	—
Диэлектрическая проницаемость	ϵ	1	1	—	—	—
Диэлектрическая восприимчивость	k_s	1	1	—	—	—
Магнитная индукция	B	$MT^{-2}I^{-1}$	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$	тесла (Т)	Гаусс (Гс)	$T=10^4$ Гс
Магнитный поток	Φ	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$	вебер (Вб)	максвелл (Мкс)	1 Вб= 10^8 Мкс
Напряженность магнитного поля	H	$L^{-1}I$	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$	ампер на метр (А/м)	эрстед (Э)	1 А/м= $4\pi \times 10^{-3}$ Э 1 Э $\approx 79,6$ А/м
Градиент напряженности магнитного поля	grad H	$L^{-2}I$	$L^{-3/2}M^{1/2}T^{-1}$	ампер на квадратный метр (А/м ²)	эрстед на сантиметр (Э/см)	—
Магнитный момент	p_m	L^2I	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$	ампер квадратный метр (А·м ²)	—	—
Магнитодвижущая сила	$F_{\text{мдс}}$	1	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$	ампер (А), ампер-виток (Ав)	гильберт (Гб)	1 Гб $\approx 0,796$ А

Намагниченность	I	$L^{-1}I$	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$	ампер на метр (А/м)	гаусс (Гс)	—
Сила магнита	F	$L^{-3}I^2$	$L^{-2}MT^{-2}$	ампер в квадрате на кубический метр (А ² /м ³)	эрстед в квадрате на сантиметр (Э ² /см)	—
Магнитная сила	$F_{\text{магн}}$	LT^{-2}	LT^{-2}	ньютон на килограмм (Н/кг)	дин на грамм (дин/г)	—
Магнитная проводимость	σ_m	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	$L^{5/2}M^{-1/2}T$	вебер на ампер (Вб/А)	максвелл на квадратный эрстед ($\frac{\text{Мкс} \cdot \text{см}}{\text{Э}}$)	—
Магнитное сопротивление	ρ_m	$L^{-2}M^{-1}T^2I^2$	$L^{-5/2}M^{1/2}T^{-1}$	ампер на вебер (А/Вб)	эрстед в квадрате на максвелл-сантиметр ($\frac{\text{Э}^2}{\text{Мкс} \cdot \text{см}}$)	—
Абсолютная магнитная проницаемость	μ_a	$LMT^{-2}I^2$	1	генри на метр (Г/м)	—	—
Магнитная постоянная	μ_0	$LMT^{-2}I^{-2}$	1	генри на метр (Г/м)	—	—
Магнитная проницаемость	μ	1	1	—	—	—
Магнитная восприимчивость	χ	1	1	—	—	—
Удельная магнитная восприимчивость	κ	L^3M	L^3M	—	—	—

Приложение 2
Удельная магнитная восприимчивость минералов

Минерал	Удельная магнитная восприимчивость, м ³ /кг · 10 ⁻⁶
Апатит	0,001—0,004
Берилл	0,001
Биотит	0,04—0,120
Бурый железняк	0,025—0,250
Вольфрамит	0,025—0,150
Гематит	0,050—0,250
Гетит	0,20—0,30
Гипс	0,01
Дистен	0,002—0,012
Ильменит	0,3—1,2
Касситерит	0,001—0,010
Колумбит	0,025
Магнетит	25—50
Магхемит	10—25
Манганит	0,035—0,150
Мартит	0,2—10
Моноцит	0,010—0,025
Пирит	0,005—0,040
Пирролизит	0,025—0,100
Роговая обманка	0,050—0,300
Рутил	0,002—0,015
Сидерит	0,035—0,150
Тальк	0,030
Турмалин	0,010—0,125

Приложение 3
Техническая характеристика магнитных сепараторов для мокрого обогащения сильномангнитных руд

Показатели	Марка сепаратора									
	167А-СЭ	26-СБ	167ПП-СЭ	ПБМ-4ПА	ПБМ-4ПА	ПБМ-90/250	ПБМ-П-90/250	ЭВМ-П-80/170	ЭВМ-П-80/250	ЭВМ-П-80/250
Размеры барабана, мм:										
диаметр	600	600	600	800	800	900	900	900	900	800
длина	1500	1500	1500	2500	2500	2500	2500	1700	1700	2500
тип ванны	Прямая точная	Противовоточная	Полуточная	Противовоточная	Полуточная	Противовоточная	Полуточная	Противовоточная	Противовоточная	Противовоточная
Кружность питания, мм	—6+0	—2+0	—0,2+0	—2+0	—0,2+0	—2+0	—0,2+0	—2+0	—2+0	—2+0
Напряженность магнитного поля на поверхности барабана, кА/м	70—80	70—80	70—80	70—80	70—80	110—120	110—120	90—110	90—110	90—100
Частота вращения барабана, об/мин	39	39	39	29	29	26	26	26	26	10
Установленная мощность привода, кВт	1,1	2,2	1,1	3,0	3,0	4,0	4,0	4,0	4,0	2,2
Пронзводительность, т/ч	до 35	до 60	до 15	140—200	15—70	130—180	160—250	40—90	до 50	до 50
Габаритные размеры, мм:										
длина	2080	2080	2080	3320	3300	3030	3030	3030	3100	3900
ширина	1380	1350	1410	1510	1450	1700	1700	1720	2100	2100
высота	1470	1470	1470	1650	1650	2090	2090	1980	2300	2300
Масса сепаратора, т	1,2	1,2	1,2	3,0	2,9	3,6	3,7	3,6	4,4	6,5

Приложение 4
Техническая характеристика магнитных сепараторов
для сухого обогащения сильномагнитных руд

Показатели	Марка сепаратора			
	ПБСЦ-63/50	ПБСЦ-63/100	ПБСЦ-63/200	4ПБС-63/100
Размеры барабана, мм:				
диаметр	630	630	630	630
длина	500	1000	2000	2000
Число барабанов	1	1	1	4
Крупность питания (не более), мм	3	3	3	50
Напряженность поля на поверхности барабана, кА/м	90	90	90	$\frac{80^*}{110}$
Частота вращения барабанов, об/мин	55—300	55—300	55—300	$\frac{50—100^*}{30—50}$
Установленная мощность привода, кВт	3	—	—	$\frac{2 \times 3,0^*}{2 \times 1,1}$
Производительность, т/ч	до 20	—	—	400
Габаритные размеры, мм				
длина	1200	—	—	3000
ширина	1100	—	—	3000
высота	1700	—	—	2800
Масса сепаратора, т	0,6	—	—	10,0

* В числителе указаны параметры и размеры для основных барабанов, в знаменателе — для пересчетных.

Приложение 5
Техническая характеристика магнитных сепараторов для мокрого обогащения слабомагнитных руд

Показатели	Марка сепаратора			
	2ЭВМ-30/100	4ЭВМ-30/100	2ЭВМ-38/250	4ЭВМ-38/250
Размеры валка, мм:				
диаметр	300	300	380	380
длина	1000	1000	2500	2500
Число валков	2	$\frac{2}{2^*}$	2	$\frac{2}{2^*}$
Крупность питания (не более), мм	5,0	$\frac{5,0}{5,0}$	5,0	$\frac{5,0}{5,0}$
Напряженность магнитного поля в рабочем зазоре (на выступе валка), кА/м	1200	1250	1350	1350
Частота вращения валков, об/мин	50	$\frac{50^*}{25}$	40	$\frac{45^*}{22}$
Поддача питания в рабочую зону	Нижняя	Нижняя	Нижняя	Нижняя
Установленная мощность привода валка (число двигателей X мощность), кВт	$2 \times 3,0$	$\frac{2 \times 3,0^*}{2 \times 1,5}$	$2 \times 7,5$	$\frac{2 \times 7,5^*}{2 \times 4,0}$
Производительность, т/ч	До 4	До 5	До 16	16—22
Габаритные размеры, мм:				
длина	2700	2900	5000	5100
ширина	1700	2000	2200	2900
высота	1700	2200	2400	2800
Масса сепаратора, т	5,5	11,0	19,0	36,0

* В числителе указаны параметры и размеры для основных валков, в знаменателе — для пересчетных.

Приложение 6
Техническая характеристика электромагнитных сепараторов для сухого обогащения слабомagnetных руд

Показатели	Марка сепаратора			
	ЭЭС-36/100	ЭЭС-36/100	ЭЭС-15/100*	ЭЭС-60/40
Размеры валка (диска), мм:				
диаметр	360	360	150	600
длина	1000	1000	1000	—
Число валков (дисков)	2	2	8	2
Крупность питания (не более), мм	2	2	2	2
Напряженность магнитного поля на выступе валка (диска), кА/м	1350	1400	1400	1300
Частота вращения валков (дисков), об/мин:	100—220	85—170	250—300	40
Подача питания в рабочую зону	Нижняя	Нижняя	Верхняя	Нижняя
Установленная мощность привода, кВт	15,0	16,0	24,0	3,0
Производительность, т/ч	До 12	До 7	До 12	До 0,5
Габаритные размеры, мм:				
длина	2700	2200	—	2300
ширина	1700	2100	—	840
высота	1800	2400	—	1130
Масса сепаратора, т	5,5	11,5	—	2,0

* Сепаратор не включен в ГОСТ 10512—70.

Приложение 7
Электрические свойства некоторых минералов

Минерал	Электрические свойства		
	Удельное сопротивление, Ом·м	Диэлектрическая проницаемость	Степень электропроводности
Алмаз	10 ¹⁴	16,5	Непроводник
Апатит	10 ¹⁶	7,4—10,5	»
Бiotит	—	10,3	Полупроводник
Вольфрамит	7·10 ⁷	15,0	»
Галенит	3·10 ⁶	81,0	Проводник
Гематит, мартит	3·10 ⁶	81,0	»
Гипс	—	6,8	Непроводник
Графит	7·10 ⁴	81,0	Проводник
Дистен	—	5,7—7,2	Непроводник
Золото	—	—	Проводник
Ильменит	—	33,7—81,0	»
Кальцит	10 ¹¹ —10 ¹⁶	7,8—8,5	Непроводник
Касситерит	8·10 ¹⁴	27,7	Проводник
Кварц	10 ¹⁶ —10 ²¹	6,5	Непроводник
Магнетит	1·10 ²	33,7—81,0	Проводник
Моноцит	10 ¹⁴	12,0	Непроводник
Молибден	10 ⁹	—	Проводник
Пирит	4·10 ⁸	33,7—81,0	То же
Платина	—	—	»
Рутил	—	81	»
Сидерит	10 ⁴	7,4	»
Силлиманит	—	9,3	Непроводник
Ставролит	—	6,8	»
Сфалерит	—	7,8	Проводник
Смитсонит	10 ¹⁴	8,0	Полупроводник
Сфен	—	4,0—6,6	»
Танталит	10 ⁸	—	Проводник
Титаномагнетит	1,2·10 ³	—	»
Турмалин	—	6,9	Непроводник
Флюорит	5·10 ¹⁴	6,7—7,0	»
Халькопирит	1,5·10 ⁴	—	Проводник
Хромит	—	—	»
Циркон	10 ¹⁴	17,6	Непроводник
Щерусит	—	23,1	Проводник
Шеллит	4·10 ¹⁵	8—12,0	Непроводник

Приложение 8

Техническая характеристика сепараторов
ЭКС-1250 и ЭКС-3000

Показатели	ЭКС-1250	ЭКС-3000
Осадительные электроды:		
число	2	1
длина, мм	1250	3000
частота вращения, об/мин	300—500	350—550
Диаметр электродов, мм		
осадительного	130	160
коронирующего	0,4	Игольчатый
отклоняющего	25	25
Расстояние между электродами, мм	20—50	20—50
Частота вращения барабана питателя, об/мин	До 6	До 6
Пределы регулирования рабочей щели питателя, мм	1—10	1—10
Производительность, т/ч	До 2	До 6
Температура исходного материала, °С	До 120	До 120
Питающее напряжение постоянного тока, кВ	До 20	До 20
Мощность электродвигателей, кВт	2,2	2,2
Габаритные размеры, м:		
длина	2,5	4,4
ширина	1	1
высота	3,4	2
Масса, т	2,2	2,2

Приложение 9
Техническая характеристика установок, применяемых для питания электросепараторов

Тип выпрямительного устройства	Максимальное напряжение, кВ	Пределная нагрузка (продолжительная), мА	Потребляемая мощность, кВт	Номинальное напряжение, В	Габаритные размеры (длина, ширина, высота), мм	Масса, кг
Полуволновый, с одним кенотроном, стационарный	105	25	4,5	220	Нет	260
Сдвоенный передвигной	200	6	4,0	220	560×560×1000	155
ВС-6-10	100	13	0,5	110/220	—	65*
ВС-20-10	6	10	0,8	110/220	—	120*
В-10-100	20	10	2,5	220	—	110*
ВС-50-50	50	50	5,0	220	760×450×1600	200
В-100-20	100	20	4,0	220	—	400**
В-140-5	140	5	1,5	220	—	150
В-140-5-2	140	5	1,5	220	450×200×600	150
ВУКС-90	90	10	2,5	220	Нет	150
В-110-5 (селеновый)	110	5	1,3	220	450×250×385	80
АФ-3	50	0,4	0,15	127/220	—	26
РУ-740	25	10	0,9	150	—	40
АКИ-50	50	2	0,5	127/220	—	125**
АИИ-70	50	5	2,0	127/220	—	175**
ТВО-140-50	140	200	5,0	220	—	150**
АФ-18 (механический выпрямитель)	90	225	1,8	220/380	—	1400**
АФАП-80-225	80	225	2,2	380	—	1750**
СН-8	24	0,5	20	—	—	16
КГ-50-05 (селеновый)	50	250	50	380	—	36
АФАС-80-250	80	400	25	380	1660×818×528	1830
АФАС-80-400	80	400	33	380	1780×868×730	1830

* Со стабилизатором напряжения.
** Без стабилизатора напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деркач В. Г. Специальные методы обогащения полезных ископаемых. М., «Недра», 1966. 338 с. с ил.
2. Деркач В. Г. Магнитное обогащение слабомагнитных руд. М., Metallurgizdat, 1954. 296 с. с ил.
3. Кармазин В. В., Кармазин В. И., Бинкевич В. А. Магнитная регенерация и сепарация при обогащении руд и углей. М., «Недра», 1968. 200 с. с ил.
4. Процессы и машины для обогащения полезных ископаемых. М., «Недра», 1974. 559 с. с ил. Авт.: В. И. Кармазин, Е. Е. Серго, А. П. Жендринский и др.
5. Кармазин В. И. Современные методы магнитного обогащения руд черных металлов. М., Госгортехиздат, 1962. 659 с. с ил.
6. Справочник по обогащению руд. В 3-х т. М., «Недра», 1974.
7. Крутий В. В., Скродский В. Е. Электромагнитные сепараторы для обогащения слабомагнитных руд. М., «Недра», 1968. 175 с. с ил.
8. Обогащение полезных ископаемых на МГД-сепараторах. Киев, 1969, (Гипромашуглеобогащение), 48 с. Авт.: А. М. Небренчин, А. И. Ильченко, Г. И. Дьяков и др.
9. Олофинский Н. Ф. Электрические методы обогащения. Изд. 3-е, перераб. и доп., М., «Недра», 1970. 550 с. с ил.
10. Справочник по основам электронной техники. Киев, 1972. 341 с. с ил. (Киевский университет). Авт.: Б. С. Гершунский, А. В. Романовская, Н. М. Ващенко и др.
11. Ангелов А. И., Набиулин Ю. Н. Электростатические сепараторы свободного падения. М., «Недра», 1970. 161 с. с ил.
12. Дегтяренко А. В., Искуменко В. М. Сепараторщик электрических сепараторов. М., «Недра», 1970. 81 с. с ил.

13. Карнаухов Н. М. Технология доводки коллективных концентратов с помощью электрической сепарации. М., «Недра», 1966. 167 с. с ил.

14. Мокроусов В. А., Гольбек Г. Р., Архипов О. А. Теоретические основы радиометрического обогащения радиоактивных руд. М., «Недра», 1968. 168 с. с ил.

15. Черняк А. С. Химическое обогащение руд. М., «Недра», 1965. 203 с. с ил.

16. Топерверх Н. И., Шерман М. Я. Теплотехнические измерительные и регулирующие приборы. Изд. 3 перераб. и доп. М., «Металлургия», 1966. 455 с. с ил.

17. Мясников Н. Ф. Новая технология окисленных железных руд. М., «Наука», 1971. 138 с. с ил.

18. Кошарский Б. Д. Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины. Справочное пособие. Изд. 2 перераб. и доп. Л., «Машиностроение», 1968. 880 с. с ил.

19. Гольдин М. Л. Контроль и автоматизация процессов дробления и измельчения руд. М., Атомиздат, 1965. 440 с. с ил.

20. Чугаев Р. Р. Гидравлика. Изд. 3 перераб. и доп. Л., «Энергия», 1975. 500 с. с ил.

21. Барский Л. А., Рубинштейн Ю. Б. Кибернетические методы в обогащении полезных ископаемых. М., «Недра», 1970. 312 с. с ил.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
--------------------	---

Раздел первый

Магнитные методы обогащения

Глава I. Физические основы магнитных методов обогащения	5
§ 1. Общие сведения о магнитной сепарации материалов	5
§ 2. Магнитное поле и его свойства	6
§ 3. Магнитные свойства руд и минералов	11
§ 4. Основные методы магнитных измерений	15
§ 5. Магнитные поля сепараторов	17
§ 6. Динамика процесса магнитной сепарации	31
Глава II. Магнитные сепараторы	39
§ 7. Классификация магнитных сепараторов	39
§ 8. Сепараторы для мокрого обогащения сильномагнитных руд	40
§ 9. Сепараторы для сухого обогащения сильномагнитных руд	44
§ 10. Сепараторы для мокрого обогащения слабомагнитных руд	48
§ 11. Сепараторы для сухого обогащения слабомагнитных руд	54
§ 12. Вспомогательные магнитные аппараты, применяемые на обогатительных фабриках	59
Глава III. Новые методы магнитного обогащения	63
§ 13. Магнитогидродинамическая и магнитогидростатическая сепарация	63
§ 14. Полиградиентная магнитная сепарация	69
§ 15. Термомагнитная сепарация руд	71
Глава IV. Подготовка и ведение процесса магнитной сепарации	72
§ 16. Факторы, влияющие на процесс магнитного обогащения	72
§ 17. Подготовка руд к магнитной сепарации	76
§ 18. Эксплуатация магнитных сепараторов	80
Глава V. Практика магнитного обогащения	84

Раздел второй

Электрические методы обогащения

Глава VI. Физические основы электрических методов обогащения	93
§ 19. Общие сведения об электрической сепарации минералов	93
§ 20. Электрическое поле и его свойства	94
§ 21. Электрические свойства руд и минералов	100
§ 22. Способы зарядки минеральных частиц	104
§ 23. Динамика процесса электрической сепарации минералов	112
§ 24. Методы и область применения электрической сепарации	121
Глава VII. Электрические сепараторы	124
§ 25. Классификация электрических сепараторов	124
§ 26. Электростатические сепараторы	125
§ 27. Коронные и коронно-электростатические сепараторы	131
§ 28. Трибоадгезионные сепараторы	137
§ 29. Диэлектрические сепараторы	138
§ 30. Высоковольтные устройства для электрических сепараторов	139

Глава VIII. Подготовка и ведение процесса электрической сепарации	141
§ 31. Факторы, влияющие на процесс электрической сепарации	141
§ 32. Подготовка материала к сепарации	145
§ 33. Наладка и обслуживание электрических сепараторов	147
§ 34. Правила безопасности при обслуживании электрических сепараторов	150
Глава IX. Практика электрического обогащения	151

Раздел третий

Специальные методы обогащения. Контроль и регулирование технологических процессов

Глава X. Специальные методы обогащения	159
§ 35. Обогащение сортировкой	159
§ 36. Обогащение по различию в коэффициентах трения и форме зерен	162
§ 37. Обогащение на жировых поверхностях	165
§ 38. Избирательное дробление, измельчение и декрипитация	167
§ 39. Гидрометаллургические процессы обогащения	168
Глава XI. Контроль и регулирование технологических процессов	173
§ 40. Общие положения	173
§ 41. Приборы для измерения расхода сыпучих материалов	174
§ 42. Приборы для измерения плотности пульпы	176
§ 43. Приборы для измерения расхода пульпы	178
§ 44. Схемы автоматического контроля и регулирования	180
Приложения	184
Список литературы	196

Владимир Лукьянович Егоров

Магнитные, электрические и специальные
методы обогащения руд

Редактор издательства *Т. А. Мирнова*
Переплет художника *А. Е. Григорьева*
Художественный редактор *О. Н. Зайцева*
Технический редактор *О. А. Болтунова*
Корректор *Л. В. Сметанина*

ИБ № 1651

Сдано в набор 16/VIII 1978 г. Подписано в печать 3/II 1977 г.
Т-00481. Формат 60×90^{1/16}. Бумага № 2. Печ. л. 12,5.
Уч.-изд. л. 13,2. Тираж 4800 экз. Заказ 6-395/5652-11.
Цена 62 коп.

Издательство «Недра» 103633, Москва, К-12, Третьяков-
ский проезд, 1/19.

Харьковская книжная фабрика «Коммунист» республикан-
ского производственного объединения «Полиграфкинг»
Госкомиздата УССР, Харьков, ул. Энгельса, 11.