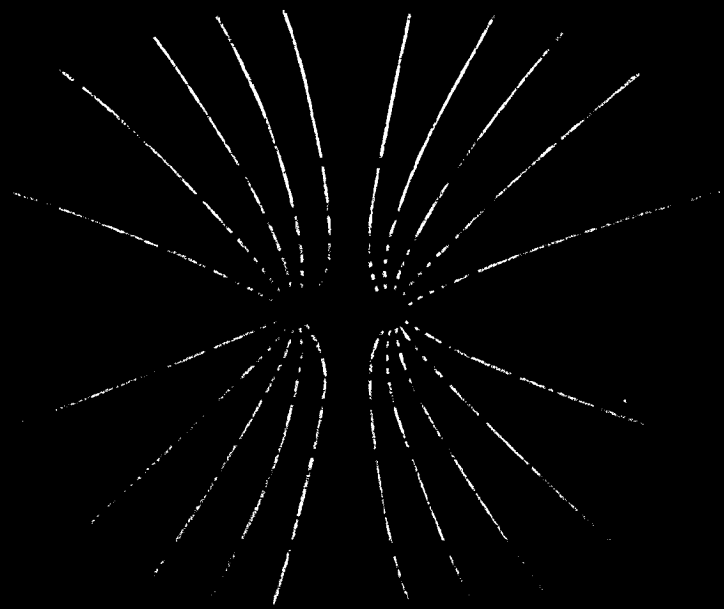


А. И. МЕСЕНЯШИН

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ
СЕПАРАЦИЯ
В СИЛЬНЫХ
ПОЛЯХ



А. И. МЕСЕНЯШИН

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ
СЕПАРАЦИЯ
В СИЛЬНЫХ
ПОЛЯХ

ТЕХНИЧЕСКАЯ
ЦЕНТРАЛЬНАЯ
ШИФР
ИЗДАНИЕ № 1447



МОСКВА «НЕДРА»
1978

Месеняшин А. И. Электрическая сепарация в сильных полях. М., Недра, 1978, 175 с.

В книге изложены основные закономерности электрических полей и электрофизические свойства частиц, обеспечивающие сепарацию минералов в сильном электрическом поле. Рассмотрены способы зарядки частиц и методы расчета сил при электросепарации. Описаны основные промышленные и опытные конструкции электросепараторов и указаны области их использования. Даны примеры применения и технологические показатели электросепарации минерального сырья. Книга написана с учетом достижений в инженерной электрофизике, технике высоких напряжений, обогащении полезных ископаемых и др.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников, занимающихся обогащением полезных ископаемых и применением сильных электрических полей в технологических процессах, а также может быть полезна студентам горных и горно-металлургических вузов.

Табл. 21, ил. 74, список лит. 68 назв.

Электрическая сепарация (электросепарация) в сильных полях начала интенсивно развиваться в последние двадцать—тридцать лет и является прогрессивным технологическим процессом. Значительный интерес к электросепарации объясняется тем, что этот процесс, решающий ряд задач обогащения полезных ископаемых, экономичен, не приводит к загрязнению окружающей среды и не потребляет воды. Однако этот вид сепарации не получил еще такого широкого распространения, которое соответствует его потенциальным возможностям. Причиной последнего в большой степени является то, что электросепарация недостаточно изучена.

Можно утверждать, что электросепарация находится на «стыке» нескольких направлений физики и техники: обогащения полезных ископаемых, электростатики, электродинамики, техники высоких напряжений, механики, газодинамики. Уровень развития каждой из этих областей достаточно высок. В то же время специалисты-обогащители недостаточно используют достижения смежных дисциплин, а специалисты-электрофизики не проводят широких исследований по изучению электрических свойств руд и возможностей применения электрических сил для сепарации конкретных минералов.

В данной книге предпринята попытка систематического изложения вопросов электрофизических основ теории электрической сепарации и ее практического приложения. Можно надеяться, что она поможет понять процессы электросепарации и предпринять дальнейшие исследования в направлении более глубокого и систематического их изучения.

Сепарация в сильных электрических полях осуществляется силами электрического поля, в результате которых сепарируемые частицы перемещаются в различные приемники, однако часть суммарного вектора сил, действующих на частицу, может составлять механическая сила (сила тяжести, инерции, сопротивления среды). Таким образом, для успешной электросепарации необходимо создать условия, при которых электрические силы будут достаточны по величине для перемещения частиц и для разных компонентов отличаться по направлению. Силовое воздействие электрического поля на частицы может реализовываться в различных формах. При этом эффективная сепарация осуществляется для частиц определенных размеров (0,05—5 мм).

Существуют несколько различных видов электросепарации, значительно отличающихся друг от друга по используемым в них физическим силам, методам зарядки и, следовательно, конечным результатам. То, что не удается осуществить с помощью одного вида электросепарации, легко осуществляется с помощью другого. При одних видах электросепарации используются свойства частиц приобретать различные заряды в процессе зарядки. При других — используются различные скорости разрядки или зарядки частиц. В некоторых конструкциях электросепараторов применяется различное механическое воздействие неоднородного электрического поля на частицы с отличающимися свойствами.

Наибольшее распространение как более эффективные получили методы электросепарации, в которых осуществляется предварительная зарядка частиц избыточными зарядами (зарядка газовыми ионами, статическая электризация). При сообщении частицам избыточных зарядов они в электрическом поле двигаются к электродам, имеющим заряд, противоположный заряду частиц. Возможно также разделение частиц, которые до помещения их в силовое электрическое поле не были заряжены, при этом одно и то же поле используется для зарядки и сепарации частиц.

Условно электрическая сепарация в воздушной среде может быть разделена на два элементарных цикла:

образование на частицах разделяемых минералов электрических зарядов (зарядка);

изменение траектории движения заряженных частиц в силовом поле, создаваемом взаимодействием электрических и механических сил (разделение).

Эффективность сепарации зависит также от подготовительных операций. Их назначением является либо создание более выгодных условий для зарядки путем усиления различий в естественных электрических свойствах минералов (сушка, термическая, химическая обработка и т. д.), либо обеспечение более благоприятного соотношения электрических и механических сил при разделении (обеспыливание, классификация по крупности и т. д.).

Способ электрической сепарации складывается, таким образом, из трех основных частей: метода подготовки материала к сепарации, метода зарядки и характера силового поля, в котором происходит разделение.

Метод зарядки (или электризации) для электрической сепарации является определяющим. Цель зарядки заключается в образовании на частицах разделяемых минералов зарядов максимально различных по своей величине и, желательнее, противоположного знака.

Использование для сепарации тех или иных свойств частиц и соответственно метода электрической сепарации осуществляется выбором конструкции электрических сепараторов, в которых основными рабочими элементами являются электроды нужной формы и конструкции, а также соответствующие источники питания высокого напряжения.

При обогащении минерального сырья электрическая сепарация характеризуется следующим:

позволяет обогащать руды, которые не обогащаются другими методами; не загрязняет окружающую среду химическими реагентами; не потребляет воды и может быть использована в районах с ограниченными водными ресурсами; не требует систем для удаления и очистки сточных вод;

позволяет осуществлять тонкое регулирование, при этом осуществление автоматизации упрощается в связи с безынерционностью управления потоком заряженных частиц;

позволяет эффективно разделять крупнозернистые минералы, что исключает дорогостоящее тонкое измельчение, необходимое для флотации;

потребляет небольшое количество электроэнергии, например по сравнению с электромагнитной сепарацией; так, мощности, необходимые для создания сильного электрического поля, значительно меньше мощностей, необходимых для транспортирования сырья к электросепаратору.

Эти преимущества в значительной степени определяются тем, что при электросепарации осуществляется непосредственное воздействие электрической энергии, сосредоточенной в электрическом поле, на обрабатываемый материал без промежуточных трансформаций энергии.

ГЛАВА 1

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ

1.1. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

При электрической сепарации используется проявление электрического поля в виде действия механических сил на электрически заряженные частицы. В рабочем пространстве сепараторов электрическое поле создают чаще всего путем подсоединения электродов к генератору высокого напряжения.

Мерой электрического поля является векторная величина \vec{E} — напряженность поля. На неподвижный точечный заряд q , находящийся во внешнем электрическом поле, действует сила

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (1.1)$$

Вектор напряженности \vec{E} по направлению совпадает с вектором электрической силы \vec{F} , действующей на положительный заряд q .

Силы, с которыми приходится иметь дело при сепарации в сильных электрических полях, ограничиваются значениями q и E . Величина заряда q определяется методами зарядки и свойствами сепарируемых частиц. Напряженность E в любой среде нельзя увеличить больше значения электрической прочности $E_{пр}$, при которой происходит пробой среды.

Заряд q имеет свое поле. Возникновение силы F определяется взаимодействием внешнего поля и собственно поля заряда.

На основании опытных данных установлено, что в вакууме и практически в воздухе заряд q обладает полем, напряженность которого в точке, отстоящей от него на расстоянии R , может быть выражена формулой

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 4\pi R^2}, \quad (1.2)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная [$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ фарад/метр (Ф/м)].

Заряд, находясь в поле другого заряда, испытывает силу, которую можно выразить формулой (1.1). Напряженность поля убывает по мере удаления от уединенного заряженного тела.

Если точечный заряд q будет находиться не в воздухе, а в однородной с одинаковыми свойствами во всех направлениях среде (диэлектрике), то

$$E = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0 4\pi R^2}, \quad (1.3)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м.

Диэлектрические проницаемости ϵ для вакуума и практически для воздуха равны 1, а любого другого диэлектрика $\epsilon > 1$.

Поэтому согласно формуле (1.3) при $q = \text{const}$ напряженность поля E в диэлектрике будет меньше, чем в воздухе, в ϵ раз; из двух последовательно расположенных диэлектриков напряженность поля будет меньше в том диэлектрике, в котором ϵ имеет большую величину.

Ослабление поля в диэлектрике объясняется явлением поляризации, при котором под действием внешнего электрического поля связанные заряды атомов и молекул диэлектрика смещаются: положительные — по направлению поля, а отрицательные — в противоположном направлении. Поле смещенных зарядов в диэлектрике противоположно внешнему полю и поэтому его ослабляет.

Помимо напряженности для характеристики электрического поля используют понятия «потенциал», «разность потенциалов», «напряжение».

Потенциал точки есть напряжение этой точки относительно земли (потенциал земли принят равным нулю). Часто говорят о напряжении электрода, помня при этом, что речь идет о напряжении относительно земли. В электростатическом поле понятия «напряжение» и «разность потенциалов» относятся к одной и той же величине.

Напряженность поля \vec{E} в заданной точке равна скорости изменения потенциала ϕ , т. е. падению напряжения на единицу длины l вдоль силовой линии, и направлена в сторону снижения потенциала. Это выражается равенством

$$\vec{E} = -\frac{\partial \phi}{\partial l} \vec{n},$$

где \vec{n} — единичный вектор.

В однородном поле при заданном расположении электродов напряженность во всех точках одинакова

$$E = \frac{U}{x},$$

где U — разность потенциалов (напряжение); x — расстояние между рассматриваемыми точками.

Так как в электротехнике потенциал и разность потенциалов измеряют в вольтах (В) или киловольтах (кВ), а расстояние в метрах (м) или в сантиметрах (см), то единицей измерения

6

величины напряженности поля будет В/м или кВ/м, а также В/см или кВ/см.

Направление векторов \vec{E} в электрическом поле изображают силовыми линиями. Так называются линии, в каждой точке которых вектор \vec{E} направлен по касательной. В неоднородном поле \vec{E} изменяется от точки к точке. Графическое изображение силовых линий и эквипотенциальных поверхностей называют картиной поля (рис. 1.1). Вдоль эквипотенциальных линий

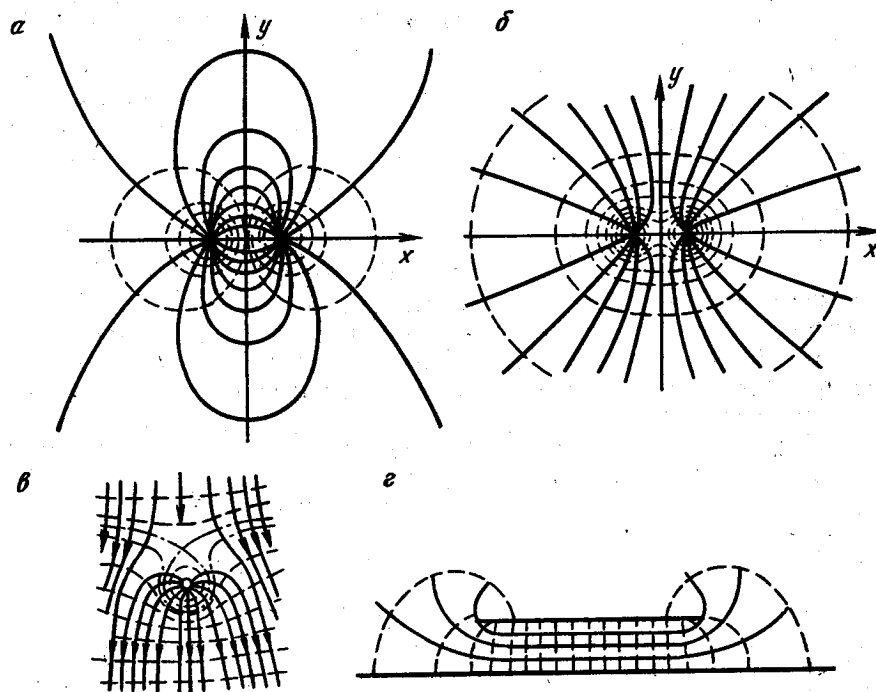


Рис. 1.1. Примеры электрических полей:

a — двух равных зарядов противоположного знака; b — двух равных зарядов одного знака; c — точечного заряда, внесенного в однородное внешнее поле; d — разноименно заряженных пластин

(поверхностей равного потенциала) поле работу не совершает, и поэтому вектор напряженности поля и, следовательно, силовая линия перпендикулярны в любой точке к эквипотенциальным поверхностям.

Электрическое поле создается по крайней мере двумя электродами, на которых заканчиваются силовые линии. Однако в некоторых случаях удобно рассматривать поле одиночного электрода. Это возможно в тех областях пространства, где

7

форма поля зависит в основном только от конфигурации одного электрода. Например, изучая форму поля вблизи проводящего электрода, можно провод рассматривать как одиночный электрод, удаленный от других проводов и земли на «бесконечное» расстояние.

1.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ В ЭЛЕКТРОСЕПАРАТОРАХ

Простейшим видом электрического поля является поле неподвижных электрически заряженных тел. Величины, его характеризующие, не зависят от времени. Такое поле называют электростатическим. Практически законы электростатических полей (законы электростатики) применимы и для медленно движущихся зарядов.

Сепараторы с рабочим электростатическим полем, которое создают подачей постоянного напряжения на рабочие электроды, были сконструированы раньше других типов электросепараторов и получили широкое применение [1]. Этим можно объяснить, что термин «электростатическая сепарация» часто распространяется на всю электрическую сепарацию, хотя в современной электросепарации используются также поля, переменные во времени. Причем применение пульсирующих, переменных промышленной частоты и сверхвысокочастотных электрических полей является весьма перспективным и может в будущем значительно расширить область использования электросепарации.

В зависимости от конфигурации (картины) поля разделяют на однородные и неоднородные. В однородном поле напряженность во всех точках одинакова. Например, однородным является поле в средней части плоского конденсатора (см. рис. 1.1, 2). В неоднородных полях напряженность изменяется вдоль силовых линий в пространстве между электродами, причем, эти поля в свою очередь разделяют на слабо-неоднородные и сильнонеоднородные. Типичным примером слабо-неоднородного поля является поле двух шаров при расстоянии между ними, не превышающем их диаметра. Степень однородности поля связана с геометрическими характеристиками электродов. Неоднородность поля возрастает с увеличением отношения расстояния между электродами к наименьшему радиусу их кривизны.

Для упрощения расчета и изображения полей используются некоторые общие принципы.

Принцип наложения. Поле нескольких зарядов в заданной точке определяется как сумма полей каждого из зарядов, взятых отдельно. Результирующая напряженность поля зарядов q_1, q_2, q_3

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3.$$

Принцип наложения указывает на то, что поле каждого из зарядов остается таким же, каким оно было бы в отсутствие других зарядов.

Принцип симметрии может быть использован для изображения поля шарового и цилиндрического электродов. Эквипотенциальные поверхности этих полей имеют также шаровую или цилиндрическую форму, а силовые линии радиальны.

Напряженность поля для шара определяется формулой (1.2), а для цилиндра

$$E = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0 2\pi R},$$

где q — заряд цилиндра на единицу длины.

Эффект близости. Распределение зарядов зависит не только от формы данного электрода, но и от взаимного расположения и формы всех электродов в заданной системе. Например, распределение зарядов на теле, расположенном вблизи электрода, существенно зависит от расстояния между ними. Во многих случаях эффектом близости можно пренебречь. При расстоянии между двумя шарообразными телами, гораздо большем, чем размеры этих тел, заряды на них распределены как на изолированных в пространстве электродах. Следовательно, при расчете напряженности поля заряды на телах можно считать сосредоточенными в их центре.

Свойства эквипотенциальных поверхностей. Поверхность тел с высокой проводимостью — проводников — является эквипотенциальной поверхностью. Наоборот, любую эквипотенциальную поверхность можно без искажения поля представить в виде тонкого проводящего листа — промежуточного электрода.

Метод зеркальных отображений основан на свойстве эквипотенциальных поверхностей. Поле заряда, расположенного вблизи хорошо проводящей поверхности, может быть найдено по методу зеркальных отображений, при котором влияние всей проводящей поверхности заменяется полем зеркального изображения данного заряда с противоположным знаком. Действительно, в поле двух зарядов средняя плоскость y оказывается эквипотенциальной поверхностью (см. рис. 1.1, а), и замена средней плоскости заземленной поверхностью не изменяет поле одиночного заряда. Фиктивное поле в каком-либо полупространстве далее не принимается в расчет; истинное поле заканчивается на проводящей поверхности и для полупространства, в котором находится заряд, аналогично полю, изображенному на рис. 1.1, а.

Краевой эффект. Напряженность поля на какой-либо эквипотенциальной поверхности наибольшая у выступов и заострений. Поэтому заряды также концентрируются на выступе

нах. Это относится к поверхности электродов и частиц. У плоских электродов наибольшая напряженность имеет место у краев электродов.

Когда напряженность у выступов становится достаточно большой, в окружающем воздухе начинается ионизация и появляются положительные и отрицательные ионы. Ионы с тем же знаком заряда, что и у выступа, движутся от выступа, ионы с противоположным знаком заряда движутся к острию и уменьшают его заряд. Дальнейшее повышение напряженности приводит к электрическому пробое воздуха.

Для получения электростатического однородного поля необходимо выполнять электроды с большим радиусом кривизны. Это делается для снижения напряженности поля в отдельных местах с целью устранения электрических разрядов. Электростатические электроды часто выполняются цилиндрическими. Их располагают так, чтобы расстояние между ними было меньше диаметра электрода. Провода, ошиновки и крепежные узлы делаются со специальными шаровыми наконечниками.

Из предыдущего изложения следует, что поле у вогнутых участков очень слабое.

Напряженность электрического поля в неоднородной среде. Не только сепарируемые частицы, но даже и элементы изоляции сепараторов не являются совершенными диэлектриками и обладают некоторой удельной проводимостью γ . В общем случае распределение напряженностей в рабочем пространстве сепаратора E_1 и в сепарируемых частицах E_2 определяется их диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 и проводимостями γ_1 и γ_2 . При переменном напряжении высокой частоты напряженность поля регулируется диэлектрическими характеристиками среды, а именно $E_1/E_2 \approx \epsilon_2/\epsilon_1$. В постоянном поле при установившемся режиме диэлектрические характеристики среды не играют никакой роли — поле определяется как в проводящей среде: $E_1/E_2 = \gamma_2/\gamma_1$. Последнее обстоятельство часто не учитывается в работах по электрической сепарации. Это можно объяснить тем, что так же, как и в теоретической физике, изучаются поля в идеальных непроводящих диэлектриках ($\gamma=0$). В таких диэлектриках постоянные поля формируются в соответствии с диэлектрическими свойствами среды. В реальных диэлектриках поле с течением времени перераспределяется в соответствии с проводимостью частиц и среды.

Электрические поля в общем случае рассчитываются сложными аналитическими и графическими методами, которые рассматриваются в специальной литературе [2]. На практике чаще всего встречаются поля простейших конфигураций и для их представления могут быть использованы изложенные здесь принципы.

Напряженность электрического поля на поверхности проводящего цилиндрического электрода. Одним из наиболее часто

встречающихся видов полей в электросепараторах является поле между двумя проводящими цилиндрами (рис. 1.2). В барабанных электростатических сепараторах один из цилиндров является осадительным электродом, а другой — отклоняющим. Особый интерес представляет напряженность на поверхности осадительного электрода (барабана), на которой осуществляется разделение частиц.

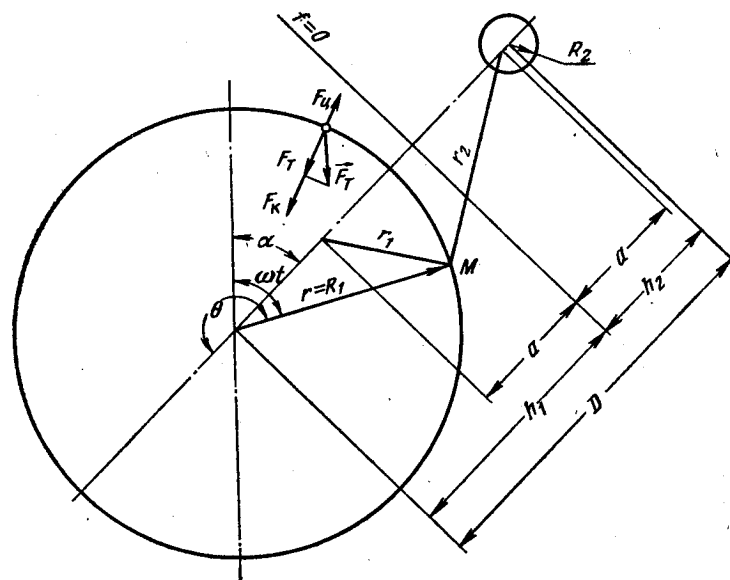


Рис. 1.2. Схема к расчету поля на поверхности барабана

В точке M потенциал поля такой системы электродов определяется по формуле

$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (1.4)$$

где τ — линейная плотность заряда; r_1, r_2 — расстояния до точки M , отсчитываемые от электрических осей, смещенных относительно геометрических на величины $h_1 - a, h_2 - a$; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная.

Для расчетов полей в электросепараторах целесообразно использовать цилиндрическую систему координат (r, θ) , ось которой совмещена с осью осадительного электрода. В этой системе координат имеем

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{r^2 + (h_1 - a)^2 + 2r(h_1 - a)\cos\theta}; \\ r_2 &= \sqrt{r^2 + (h_1 + a)^2 + 2r(h_1 + a)\cos\theta}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

причем h_1 , h_2 и a в соответствии с рис. 1.2 определяются из уравнений

$$h_1 = \frac{D^2 + R_1^2 - R_2^2}{2D}; \quad (1.6)$$

$$h_2 = \frac{D^2 + R_2^2 - R_1^2}{2D}; \quad (1.7)$$

$$a^2 = h_1^2 - R_1^2. \quad (1.8)$$

Воспользовавшись выражениями (1.4)–(1.8), найдем напряженность поля в любой точке осадительного электрода. При этом учтем, что на проводящей поверхности потенциалы всех точек имеют одно и то же значение и касательная составляющая напряженности поля на поверхности электрода ($r=R_1$)

$$E_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} = 0.$$

Поэтому величина результирующей напряженности поля на поверхности электрода совпадает с ее нормальной составляющей

$$E = E_r \Big|_{r=R_1} = -\frac{\partial \psi}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{R_1 + (h_1 - a) \cos \theta}{R_1^2 + (h_1 - a)^2 + 2R_1(h_1 - a) \cos \theta} - \frac{R_1 + (h_1 + a) \cos \theta}{R_1^2 + (h_1 + a)^2 + 2R_1(h_1 + a) \cos \theta} \right]. \quad (1.9)$$

Напряженность электрического поля нельзя увеличивать больше определенной величины, после которой наступает ионизация воздуха и его пробой. Наибольшая напряженность поля будет на линии, соединяющей центры электродов, т. е. при $\cos \theta = -1$

$$E_0 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \frac{2a}{a^2 - (R_1 - h_1)^2}. \quad (1.10)$$

Обычно величиной E_0 можно задаться, например, из условия получения максимальной напряженности E , при которой еще не возникает ионизация. Тогда целесообразно напряженность E выразить через E_0 , исключив в выражении (1.9) значение τ ,

$$E = E_0 \frac{h_1 - R_1}{h_1 + R_1 \cos \theta}. \quad (1.11)$$

Напряжение между цилиндрическими электродами определяется как разность потенциалов между ними, т. е.

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{(h_1 + a)(h_2 + a)}{R_1 R_2}.$$

или, с использованием формулы (1.10), имеем

$$U = E_0 \frac{a^2 - (R_1 - h_1)^2}{2a} \ln \frac{(h_1 + a)(h_2 + a)}{R_1 R_2}.$$

Из выражения (1.11) следует, что распределение напряженности электрического поля на осадительном электроде с заданным радиусом R_1 определяется параметром h_1 . Чем меньше h_1 , тем неоднороднее электрическое поле на поверхности электрода (рис. 1.3). Параметр h_1 может быть подобран путем изменения расстояния между электродами при разных диаметрах отклоняющего электрода. Электрическое поле на барабане становится более неоднородным при уменьшении диаметра барабана или расстояния между электродами [3].

1.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ВОЗДУХЕ

Свойства электрического разряда в воздухе существенно влияют на процесс электросепарации. С одной стороны, электрическая прочность воздуха ограничивает максимальные значения напряженности электрического поля E и тем самым силы, действующие на частицы, с другой, — коронный разряд в воздухе позволяет осуществить эффективную зарядку частиц и поэтому существенно расширить возможности процесса.

В воздухе в результате различных внешних воздействий (ультрафиолетовое излучение солнца, космические лучи и т. д.) всегда имеется некоторое количество ионов и электронов, сообщающих воздуху определенную проводимость. Например, в 1 см³ атмосферного воздуха каждую секунду создается несколько десятков пар ионов, которые через определенное время рекомбинируют друг с другом и снова превращаются в нейтральные молекулы. Если к газовому промежутку между плоскими электродами подвести постоянное напряжение, величину которого можно изменять, ионы начнут двигаться вдоль силовых линий поля, создавая ток I во внешней цепи. По мере увеличения приложенного напряжения этот ток возрастает (рис. 1.4) за счет того, что большая часть ионов успевает достичь электродов, не рекомбинируя в пространстве. Режим насыщения наступает тогда, когда ионы в пространстве практически не рекомбинируют. При дальнейшем увеличении напряжения ток начинает снова возрастать, что свидетельствует о начавшейся ионизации воздуха под действием электрического поля. При некотором значении напряжения происходит резкое увеличение тока, которое указывает на внезапное качественное изменение состояния воздуха. Это напряжение называется пробивным напряжением воздушного промежутка; при достижении пробивного напряжения воздух теряет свойства диэлектрика и превращается в проводник. К воздуху (или другому диэлек-

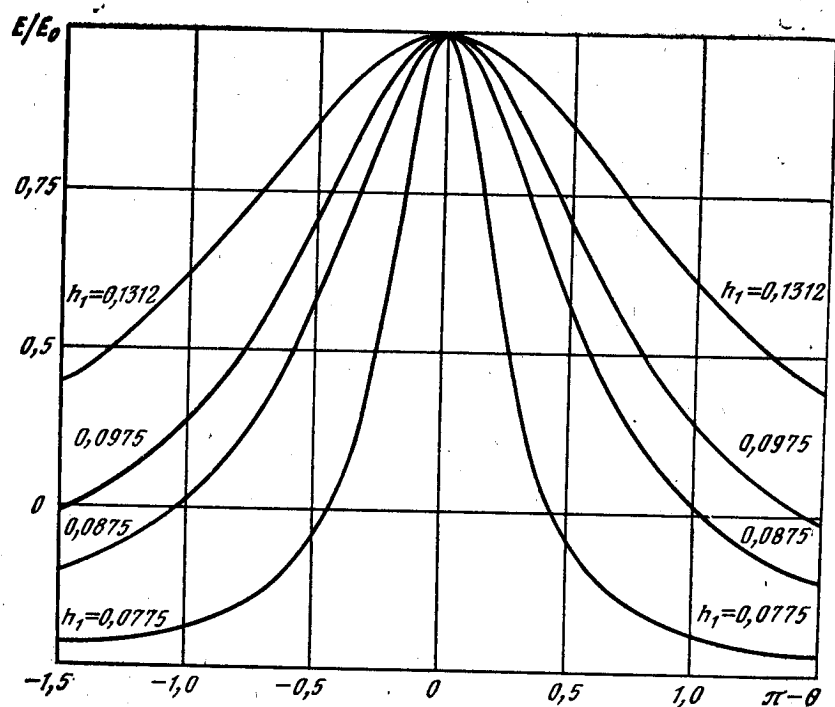


Рис. 1.3. Распределение напряженности электрического поля на электроде радиуса $R_1=7,5$ см для разных значений параметра h_1

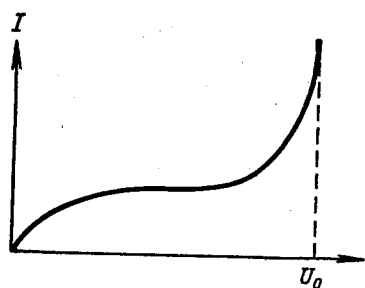


Рис. 1.4. Зависимость тока в газе от напряжения между электродами

трику) напряжение больше пробивного не может быть приложено.

В электросепараторах электроды, находящиеся под высоким напряжением, отделены друг от друга воздушными промежутками, в которых воздух является основным изолятором. Пробивные напряженности воздушных промежутков определяют предельные напряженности поля, при которых еще могут работать электросепараторы. В первом приближении пробивное напряжение изменяется пропорционально межэлектродному расстоянию.

При нормальных условиях в однородном поле электрическая прочность воздуха достигает 30 кВ/см. В электросепараторах,

Когда между электродами и на электродах находятся частички материала, воздух запылен, предельная напряженность поля значительно понижается и составляет 4—5 кВ/см. Если на электродах имеются острые края, неровности, то предельная напряженность поля становится еще меньше. Установлено, что пробивные напряжения промежутков стержень—плоскость и стержень—стержень имеют наименьшие значения в сравнении с напряжениями промежутков между электродами иной формы, например плоскость—плоскость, шар—плоскость.

Пробивное напряжение воздуха зависит от частоты при переменном токе, от полярности электродов при постоянном токе, от формы импульса, а также от относительной плотности воздуха и содержания в нем паров воды.

Характер разряда в сильнонеоднородном поле зависит от полярности электрода с малым радиусом кривизны. При положительной полярности электрода наблюдается существенный разброс между максимальными и средними значениями пробивного напряжения. Разброс пробивных напряжений при отрицательной полярности выступа значительно меньше и составляет всего $\pm 3\%$. В связи с незначительным различием между максимальными и средними значениями пробивного напряжения при отрицательной полярности электрода эта полярность позволяет достичь более высоких предельных напряженностей, чем положительная полярность. Поэтому в электросепараторах на отклоняющих электродах и проводах преимущественно создается отрицательная полярность.

Электрическую прочность воздуха можно увеличить путем глубокого его разряжения, близкого к вакууму, или, наоборот, путем сжатия его до высоких давлений. Оба эти способа могут быть использованы при электросепарации.

Конструкции электросепараторов желательно создавать такими, чтобы прочность воздушной изоляции была ниже прочности твердой изоляции. Например, предпочтительнее перекрытие изоляторов, чем их пробой. В первом случае электрическая прочность конструкции обычно восстанавливается без каких-либо последствий. Во втором—требуется смена пробитого изолятора, что связано с отключением установки.

1.4. КОРОННЫЙ РАЗРЯД

Коронный разряд, или корона, является своеобразной формой разряда, характерной для сильнонеоднородных полей, когда ионизация воздуха происходит только в небольшой области вблизи электрода. При этом в промежутке между электродами не возникает сквозного проводящего канала, поэтому образование коронного разряда не означает полной потери воздушным промежутком изолирующих свойств. Типичными электродами для создания этой формы разряда являются тон-

кие проволочки, заостренные иглы, размещенные вблизи плоскостей или цилиндров с большим радиусом (рис. 1.5). На плоском электроде корона может возникнуть на границе металл—диэлектрик [4].

В сильнонеоднородных полях напряженность особенно велика вблизи электрода с малым радиусом кривизны. При удалении от электрода напряженность поля резко уменьшается. Поэтому при приложении к разрядному промежутку определенного напряжения величина напряженности, достаточная для возникновения разряда, имеет место только в области, приле-

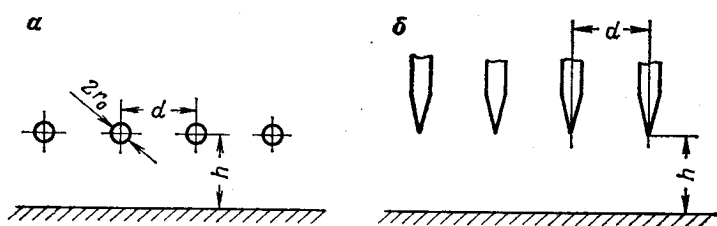


Рис. 1.5. Система коронирующих электродов:
а — ряд проводов, параллельных плоскости; б — игла — плоскость

гающей к электроду с малым радиусом кривизны. Разряд оказывается локализованным вблизи этого электрода, который называют коронирующим. Коронному разряду соответствует возрастающая часть вольтамперной характеристики (см. рис. 1.4). Чтобы произошел пробой всего промежутка, нужно увеличить напряжение между электродами.

Для возникновения короны требуется определенная степень неоднородности поля. При больших радиусах электродов корона является неустойчивым явлением и будет лишь кратковременным этапом перед возникновением пробоя. Всегда соблюдается правило, чем меньше однородность поля, тем больше расхождение между напряжением возникновения короны и пробивным напряжением. Таким образом, при прочих равных условиях вероятность возникновения короны тем больше, чем тоньше коронирующий провод или острее конец игольчатого электрода. Ионизация и сопутствующие ей процессы рекомбинации и перехода возбужденных молекул в нормальное состояние способствуют образованию квантов света, благодаря чему создается своеобразное сияние вокруг коронирующего электрода, отсюда и произошло название «корона».

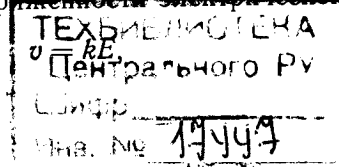
Образующиеся в зоне ионизации носители электрического заряда под действием сил поля движутся в этом поле, т. е. возникает электрический ток коронного разряда. Носители зарядов, знак которых совпадает со знаком коронирующих электродов, выносятся из зоны ионизации во внешнюю по отношению

к ней темную область пространства к другому электроду — осадительному. Способность коронного разряда служить источником большого числа носителей зарядов одного знака и переносить их через воздух к заряжаемой поверхности дает возможность применять коронный разряд в электросепарации для зарядки сепарируемых частиц. При короне с возникновением тока поле между электродами становится динамическим, поэтому для этого случая нельзя определять напряженность по формулам, пригодным для определения напряженности электростатического поля.

При напряжении возникновения короны ток представляет собой явление прерывистое, при осциллографировании наблюдаемое в форме импульсов длительностью около 10^{-8} с, несущих заряды порядка $2 \cdot 10^9$ пар электронов и положительных ионов; по мере повышения напряжения частота следования импульсов увеличивается от единиц до нескольких сотен килогерц. Импульсы тока короны с электрода отрицательной полярности возникают в момент достижения начального напряжения короны и продолжают существовать при дальнейшем повышении напряжения. Импульсы тока короны с электрода положительной полярности возникают также при начальном напряжении и существуют лишь в весьма узком диапазоне напряжения, превышающем начальное. В этих условиях наблюдаются регулярно повторяющиеся вспышки коронного тока. При последующем повышении напряжения импульсы коронного тока сливаются в непрерывный ток короны.

Характер свечения вокруг коронирующего электрода связан с особенностями развития разряда при различных полярностях. В случае отрицательного коронного разряда на поверхности провода возникают отдельные все время перемещающиеся светящиеся точки. При положительном коронном разряде свечение на поверхности провода более равномерное.

В направлении сил электрического поля ионы и электроны на длине свободного пробега движутся равномерно-ускоренно и накапливают кинетическую энергию; однако в процессе столкновений эта энергия частично или полностью передается другим частицам, т. е. движение ионов или электронов в воздушной среде аналогично движению с трением. В очень слабых полях в процессе взаимных столкновений ускоряемые ионы и электроны теряют лишь часть накопленной кинетической энергии, но при некоторой критической напряженности электрического поля рассеянная в столкновениях энергия возрастает настолько, что средняя скорость движения ионов и электронов стабилизируется. Постоянная скорость ионов и электронов v характерна, в частности, для коронного разряда, при котором она пропорциональна напряженности электрического поля, т. е.



где k — коэффициент пропорциональности или его называют еще подвижностью; он численно равен средней скорости при $E=1$ В/см.

Подвижность ионов обоих знаков в момент их возникновения в воздухе при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 20°C одинакова и равна примерно $2,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, однако уже через 10^{-2} с (после 10^7 столкновений) подвижность несколько снижается и становится для положительных и отрицательных ионов соответственно $k_+=1,6 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и $k_-=2,2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Снижение подвижности иона происходит из-за прилипания его к молекуле и увеличения вследствие этого массы образовавшегося комплекса — тяжелого иона.

Пары воды имеют низкую подвижность [$0,6 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при 100°C] и захват ионов парами воды, находящимися в воздухе, снижает их подвижность и затрудняет развитие ионизационных процессов. При наличии паров воды особенно уменьшается подвижность отрицательных ионов.

Одной из важнейших характеристик коронного разряда является зависимость тока короны от величины напряжения, т. е. вольтамперная характеристика. Эта зависимость показывает эффективность коронирующих электродов разных конструкций и позволяет определить мощность, потребляемую током коронного разряда (рис. 1.6) [5]. В электросепараторах ток коронного разряда составляет $0,5\text{--}2$ мА на 1 м длины коронирующего провода при напряжении $15\text{--}30$ кВ. Ток коронного разряда тем больше, чем ближе рабочее напряжение к пробивному, поэтому для увеличения заряда частиц необходимо поддерживать напряжение на электродах на максимально высоком уровне.

В случае пробоя коронирующего промежутка ток разряда короны возрастает в сотни раз. Например, если электродами являются металлические иглы диаметром $0,1$ см и плоскость, коронный разряд возникает при разности потенциалов 8 кВ и сопровождается током $0,1\text{--}1$ мкА; при пробое ток доходит до нескольких сотен микроампер.

Ток коронного разряда зависит от вида коронирующих электродов (проволочный, игольчатый), взаимного расположения электродов, их полярности. Для определенной конструкции существует оптимальное число коронирующих электродов на единицу длины, при котором суммарная сила тока короны всех электродов имеет максимум. При значительном увеличении числа электродов поле перестает быть неоднородным и коронирование вообще прекратится.

Вольтамперная характеристика зависит от температуры и влажности окружающей среды (рис. 1.7) [5]. При увеличении влажности или уменьшении температуры ток уменьшается, и наоборот. Особое значение имеет зависимость тока короны от влажности, так как в настоящее время при электросепара-

ции кондиционирование воздуха еще не применяется и колебания влажности приводят к существенному изменению технологических показателей. Регулирование же температуры осуществляется нагревом материала и сепаратора.

В запыленном воздухе и при наличии на осадительном электроде слоя непроводящих частиц ток коронного разряда

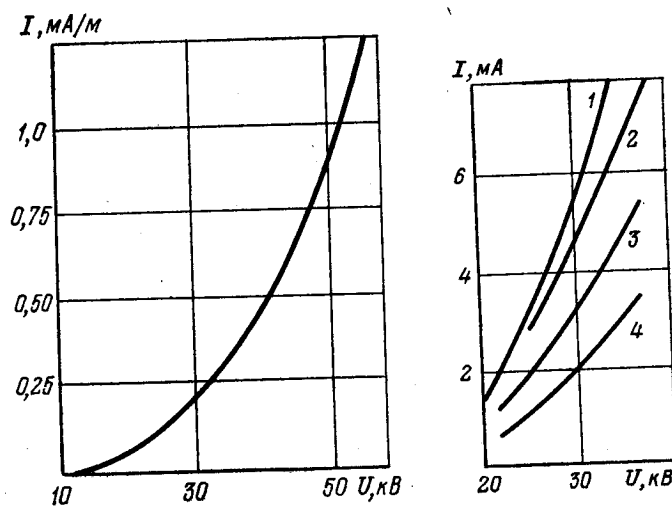


Рис. 1.6. Вольтамперная характеристика коронирующих электродов

Рис. 1.7. Вольтамперная характеристика в зависимости от влажности воздуха:

1 — 12 г/м^3 ; 2 — 29 г/м^3 ; 3 — 75 г/м^3 ; 4 — 120 г/м^3

меньше, чем в чистом воздухе. Объясняется это тем, что заряд частиц ослабляет напряженность в зоне короны, кроме того, пыль, осаждающаяся на коронирующих электродах, увеличивает их диаметр.

Известно явление так называемой обратной короны, которая возникает у покрытого пылью и сепарируемыми частицами осадительного электрода. Обратная корона появляется при пробое слоя частиц, покрывающего осадительный электрод, что имеет место при определенном напряжении на этом слое. Это явление сопровождается движением ионов в направлении к коронирующему электроду и нейтрализацией зарядов коронирующего электрода. Обратная корона снижает эффективность зарядки частиц в поле коронного разряда.

На плоских электродах может возникнуть местная корона, которая появляется в точках неоднородности поверхности электрода — на заусеницах, частицах сепарируемого материала, прилипших к электроду. Местная корона часто начинается при сравнительно небольших напряженностях в виде светящихся

точек на электроде и может нарушить процесс электросепарации, так как приводит к перезарядке частиц.

Коронный разряд в воздухе сопровождается образованием озона (O_3) и окислов азота (NO_2), которые при длительном воздействии разрушают органические изоляционные материалы. Механическое воздействие короны проявляется в виде электрического ветра, т. е. движения ионов и увлекаемых ими нейтральных молекул, сопровождающегося характерным шелестом. Реактивное действие электрического ветра может вызвать вибрацию электродов.

1.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ

Основные методы исследования электрических свойств частиц разработаны применительно к специально выбранным естественным или искусственным веществам, используемым в электротехнике в качестве проводников, диэлектриков и полупроводников. При сепарации такое деление частиц оказывается еще более условным, чем в электротехнике, так как свойства компонентов сепарируемого материала зависят от методов их подготовки перед сепарацией; кроме того, приходится иметь дело с веществами, содержащими различные примеси, часто непостоянные даже в пределах одного месторождения.

Об основных электрических свойствах частиц можно судить по их электрической проводимости и диэлектрической проницаемости. Проводящие свойства минералов обусловлены наличием в них обладающих электрическим зарядом свободных элементарных частиц (электроны или положительные и отрицательные ионы) и незанятых валентными электронами мест в атомах (так называемых дырок). Эти заряды приходят в упорядоченное движение под действием электрического поля и способны разряжаться, доходя до электродов, или переходить в металлические электроды.

Проводимость частиц. Различают объемную и поверхностную электрическую проводимость. Для сравнительной оценки различных материалов в отношении их объемной и поверхностной электрической проводимости пользуются значениями удельного объемного сопротивления ρ_v и удельного поверхностного сопротивления ρ_s .

По удельному объемному сопротивлению может быть определена удельная объемная электрическая проводимость согласно выражению

$$\gamma_v = 1/\rho_v$$

и соответственно удельная поверхностная проводимость

$$\gamma_s = 1/\rho_s$$

В случае плоского образца материала при однородном поле удельное объемное сопротивление (в Ом·м) рассчитывается по формуле

$$\rho_v = R \frac{S}{h},$$

где R — объемное сопротивление образца, Ом; S — площадь электрода, m^2 ; h — толщина образца, м.

Удельное поверхностное сопротивление численно равно сопротивлению квадрата (любых размеров), мысленно выделенного на поверхности материала, если ток проходит через две противоположные стороны этого квадрата.

Удельное поверхностное сопротивление ρ_s (в Ом) рассчитывается по формуле

$$\rho_s = R_s \frac{l}{b},$$

где R_s — поверхностное сопротивление образца материала между параллельно поставленными электродами длиной l , отстоящими друг от друга на расстоянии b .

Удельная поверхностная электрическая проводимость γ_s измеряется в сименсах (См). Объемная проводимость частиц определяется материалом частицы и температурой. В некоторых случаях электрическая проводимость не одинакова по разным осям кристалла.

Поверхностная проводимость в значительной степени определяется наличием влаги на поверхности частиц, загрязнением их поверхности, температурой. Вода имеет значительную проводимость. Достаточно тончайшего слоя влаги на поверхности частицы, чтобы была обнаружена заметная электрическая проводимость, определяемая в основном толщиной этого слоя. Однако поскольку сопротивление адсорбированной влаги связано с природой материала, на поверхности которого она находится, поверхностная проводимость рассматривается как свойство самого материала.

Рассмотрим влияние влажности на величины сопротивлений различных веществ на примере слюды мусковит. После длительного пребывания слюды в воздухе с относительной влажностью 30% ρ_v вдоль слоев равно 10^8 Ом·м, а с относительной влажностью 100% — 10^5 Ом·м. В воздухе с нулевой относительной влажностью ρ_s становится равным $2 \cdot 10^{14}$ Ом, а с относительной влажностью 98% — $5 \cdot 10^9$ Ом.

Полная электрическая проводимость частиц, влияющая на сепарацию, складывается из объемной и поверхностной проводимости в общем случае сложным образом, зависящим от формы частиц.

Значительное влияние на процессы в электросепараторе оказывает сопротивление контакта частицы с электродом. Оно зависит от формы и поверхностного сопротивления частицы.

Величины электрических сопротивлений минералов, входящих в состав обогащаемой руды, дают представление о возможности их разделения в электрических сепараторах; так разделение непроводников и проводников может надежно осуществляться с помощью барабанных коронных сепараторов. Ориентировочные значения ρ_v для некоторых минералов приведены в табл. 1.1. Результаты измерений показывают, что сопротивления, могут колебаться в пределах 3—4 порядков.

Методы определения объемного и поверхностного сопротивления разработаны для однородных полей, поэтому измерения осуществляются на образцах размером $25 \times 25 \times 0,5$ мм. Для реальных минералов определение значений ρ_v и ρ_s связано со значительными трудностями, так как размер чистых природных зерен минералов часто меньше нескольких миллиметров.

При исследовании на обогатимость конкретной руды может быть использована установка, принципиальная схема которой показана на рис. 1.8. Изоляцию проводящих электродов друг от друга необходимо выполнять высокоомным диэлектриком, например фторопластом. Сопротивления можно определять тераомметром или методом вольтметра и амперметра [1]. Следует учитывать, что ввиду неопределенности размеров и формы частиц, давления между частицами невозможно точно зафиксировать площадь контакта частиц с измерительным электродом и переходное сопротивление в месте контакта, поэтому величины сопротивлений, измеренные на данной установке, имеют относительный характер.

Диэлектрическая поляризация. Нейтральные молекулы любого вещества содержат попарно связанные заряды. Под действием электрического поля связанные заряды атомов и молекул смещаются: положительные — по направлению поля, а отрицательные — в противоположном направлении. Смещение может происходить как на микроскопические, так и на макроскопические расстояния в пределах образца. Если же вещество содержит полярные молекулы, то они будут повернуты электрическим полем. Вся эту группу явлений называют диэлектрической поляризацией, а вещество с упорядоченной ориентацией атомов и молекул поляризованным.

В результате поляризации на поверхностях вещества образуются заряды разных знаков, которые создают свое поле как внутри частицы, так и вне ее. На стороне, обращенной к положительному электроду, возникает отрицательный заряд, а на стороне, обращенной к отрицательному электроду, — положительный. Поле смещенных зарядов противоположно внешнему полю и поэтому его ослабляет.

О явлениях, связанных с поляризацией вещества, можно судить по величине диэлектрической проницаемости ϵ . Диэлектрическая проницаемость минералов (см. табл. 1.1) изменяется от трех (для непроводников) до $\epsilon \rightarrow \infty$ (для проводни-

Таблица 1.1

Минерал	Характеристика минералов по их физическим свойствам	Формула	Содержание основного элемента или оксида, %	Плотность, г/см ³	Сопротивление, Ом·м	Диэлектрическая проницаемость	Характеристика сопротивления
Алмаз		C	100 C	3,2—3,5	10 ¹⁰	16,5	Непроводник
Анагас		TiO ₂	60 Ti	3,8—3,9	10 ⁴ —10 ¹¹	48,0	Проводник
Антимонит		Sb ₂ S ₃	71,4 Sb	4,5—4,6	10 ¹²	5,7—7,0	Непроводник
Ангидрит		CaSO ₄	41,2 CaO	2,8—3,0		7,4—10,5	»
Апатит		Ca ₅ (PO ₄) ₃ F	42,3 P ₂ O ₅	3,1—3,2			»
Арсенопирит		Ca ₃ (PO ₄) ₂ Cl	41,0 P ₂ O ₅	5,9—6,2	10 ⁻⁴ и		Проводник
Аргентит		FeAsS	46,0 As	7,2—7,4	10 ¹³ —10 ¹⁴		Проводник при высоких температурах
Барит		Ag ₂ S	87,1 Ag	4,3—4,6	10 ¹²	5,0—12,0	Непроводник
Берилл		BaSO ₄	65,7 BaO	2,6—2,9		3,9—7,7	»
Биотит		Be ₃ Al ₂ (Si ₆ O ₁₈)	14,1 BeO	3,0—3,1		6,0—10,0	»
Борнит		K (Mg, Fe) ₃ (Si ₄ AlO ₁₀) × × [OH, F] ₂	—	4,9—5,2	10 ⁻¹ —10 ⁻³		Проводник
Бурый железняк (лимонит), гётит		Cu ₃ FeS ₄	63,3 Cu	3,3—4,0	10 ³ —10 ⁵		»
Буланжерит		HFeO ₂ ·aq	89,9 Fe ₂ O ₃	6,23			»
Бурый шпат (анкерит)		Pb ₅ SbS ₁₁	55,4 Pb	2,9—3,1			Непроводник
Волластонит		Ca (Mg, Fe) [CO ₃] ₂	25,7 Sb	2,8—2,9	10 ⁵ —10 ⁶	15,0	»
Вольфрамит		Ca ₂ (Si ₃ O ₉)	48,3 CaO	7,3	10—10 ⁴		»
Висмутин		(MnFe) WO ₄	75,0 WO ₃	6,4—6,6			»
Витерит		Bi ₂ S ₃	81,2 Bi	4,2—4,3	10	7,5	»
Вюртцит		BaCO ₃	77,7 BaO	4,0—4,3	10 ⁻⁵ —10 ⁻²	8,3	Проводник
Галенит		ZnS	67,1 Zn	7,4—7,6		>81,0	»
Галит (каменная соль)		PbS	86,6 Pb	2,1—2,2	10 ⁴ —10 ⁵		Непроводник
Гаусманит		NaCl	60,6 Cl	4,7—4,9			»
		MnMn ₂ O ₄	72,0 Mn				

Минерал	Формула	Содержание основного эле- мента или окисла, %	Плотность, г/см ³	Сопровождающие, Ом·м	Диэлектриче- ская прони- цаемость	Характеристика сопротивления
Гематит, мартит	Fe ₂ O ₃	70,0 Fe	5,0—5,3	10—10 ³	25,0	Проводник
Гипс	CaSO ₄ ·2H ₂ O	32,5 CaO	2,3		8,0—11,6	Непроводник
Гранат	Mg ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	100 C	3,5—4,2	10 ⁻⁶ —10 ⁻⁴	>81	»
Графит	Al ₂ SiO ₄ O	63,1 Al ₂ O ₃	2,09—2,23	10 ² —10 ³	5,7—7,2	Проводник
Джеспонит	Pb ₄ FeSb ₆ S ₁₄	30,4 CaO	3,6—3,7			Непроводник
Доломит	CaMg(CO ₃) ₂	90,0 Au	5,63			—
Золото	Au	1,8—2,9	19,3			Непроводник
Ильменит	FeTiO ₃	52,6 Ti ₂ O	15,6—18,3	1—10 ⁻³	>81	Проводник
Кальцит	CaCO ₃	56,0 CaO	4,7	10 ⁷ —10 ¹¹	33,7—81,0	»
Касситерит	SnO ₂	78,8 Sn	2,6—2,7	10	7,8—8,5	Непроводник
Кварц	SiO ₂	100,0 SiO ₂	6,8—7,0	10 ¹² —10 ¹⁷	21,0	»
Кинноварь	HgS	86,2 Hg	2,5—2,8	10 ⁷	4,2—5,0	»
Кобальтин	CoAsS	35,4 Co	8,1—8,2	10 ⁴ —10	33,7—81	»
Ковеллин	CuS	45,3 As	6,0—6,5			—
Корунд	Al ₂ O ₃	66,5 Cu	4,59—4,67	10 ⁻⁶ —10 ⁻³		Проводник
Куприт	Cu ₂ O	53,2 Al	3,9—4,1	10 ⁻⁴ ; 10 ⁴ —10 ⁶	5,6—6,3	»
Магнетит	FeFe ₂ O ₄	88,8 Cu	6,0	10 ⁻⁴ —10 ⁻³	6,0	—
Марказит	FeS ₂	72,4 Fe	4,9—5,2	10 ⁻⁶ —10 ⁻⁴	33,7—81,0	Проводник
Микроклин	K[AlSi ₃ O ₈]	46,6 Fe	4,6—4,9	10 ³	33,7—81,0	»
Микролит	(Na, Ca) ₂ Ta ₂ O ₆ [F, OH]	68—77 Ta ₂ O ₅	2,5		5,0—6,9	Непроводник
Молибденит	MoS ₂	60 Mo	5,4—6,4	10 ⁻³ , 10 ²	>81	Проводник при по- вышенной темпера- туре
Монацит	(Ce, La, Th) PO ₄	5—28 ThO ₂ 50—68 CeLa	4,7—5,0	>10 ¹⁰	12	Непроводник
Мусковит	KAl ₂ [(AlSi ₃ O ₁₀)]OH ₂	43,9 Ni	2,8—3,1	<10 ¹⁰	6,5—8,0	Проводник
Никелин	NiAs	56,1 As	7,6—7,8	10 ⁻⁴		Непроводник
Оливин	(Mg, Fe) ₂ SiO ₄	45—50 MgO	3,3—3,5		6,8	»
Ортоклаз	K(AlSi ₃ O ₈)	64,7 SiO ₂	2,6	10 ⁻³	5,0—6,2	Проводник
Пентландит	(Fe, Ni) ₉ S ₈	18,4 Al ₂ O ₃	4,5			»
Пирит	FeS ₂	27—50 Fe	4,9—5,2	10 ⁻⁵ —10 ⁻¹	33,7—81,0	»
Пирролюзит	MnO ₂	10—42 Ni	4,7—5,0	<10 ⁴	>81	»
Пирротин	Fe _{1-x} S	53,4 S	4,6—4,7	10 ⁻⁵ —10 ⁻³	>81	»
Пироп	Mg ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	до 40 S	3,5	>10 ¹⁰	4,1—4,5	Непроводник
Пирохлор	(Na, Ca...) ₂ (Nb, Ti) ₂ X ₆ [F, OH]	44,8 SiO ₂ до 63 Nb ₂ O ₅	4,0—4,4			Проводник
Платиоклаз	Na[AlSi ₃ O ₈] и др.	72 MoO ₃	2,5—2,8			Непроводник
Повеллит	CaMoO ₄	60—80 MnO ₂	4,3—4,5			Непроводник
Псиломелан	mMnO·MnO ₂ ·nH ₂ O	70,1 As	4,2—4,7	10 ² —10 ³	4,9—58	Проводник
Реальгар	AsS ₃	60 Ti	3,4—3,6	1—10 ²	89—173	»
Рутил	TiO ₂	43 MgO	4,2—5,2	10—10 ²	10,0	Непроводник
Серпентин	Mg ₆ (Si ₄ O ₁₀)[OH] ₈	48,3 Fe	2,5—2,7	10 ¹⁰	7,4	Проводник
Сидерит	FeCO ₃	63,1 Al ₂ O ₃	3,9		9,3	Непроводник
Силлманит	Al(AlSiO ₆)	52,0 Zn	3,2—3,3		8,0	»
Смитсонит	ZnCO ₃	8,1 Li ₂ O	4,1—4,5		8,4	»
Сподумен	LiAl[Si ₂ O ₆]	55,9 Al ₂ O ₃	3,6—3,8	10—10 ³	6,8	»
Старролит	FeAl ₄ (SiO ₄) ₂ O ₂ [OH] ₂	29,5 Cu	4,3—4,5			Проводник
Станнин	Cu ₂ FeSn ₃ S ₄	27,5 Sn	3,5—4,0	10 ⁻⁵ ; 10 ⁶	7,8	—
Сфалерит	ZnS	67,1 Zn	3,3—3,6		4,0—6,6	—
Сфен	CaTi[SiO ₄]O	40,8 TiO ₂				

Продолжение табл. 1.1

Минерал	Формула	Содержание основного элемента или оксида, %	Плотность, г/см ³	Сопротивление, Ом·м	Диэлектрическая проницаемость	Характеристика сопротивляемости
Танталит	(FeMn)Ta ₂ O ₆	77,6 Ta ₂ O ₆	5,2—8,2	10 ²	—	—
Тенорит	CuO	79,9 Cu	5,8—6,4	10 ³	—	—
Тетраэдрит	Cu ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	22—53 Cu	4,4—5,4	10 ⁻⁸ ; 10 ³	—	—
Титанмагнетит	FeFe ₂ O ₄	72,4 Fe	4,9—5,2	10 ¹¹ —10 ¹²	6,6	Непроводник
Топаз	Al ₂ [SiO ₄](F, OH) ₂	48,2—62 Al ₂ O ₃	3,5—3,6	10 ¹⁰	6,9	»
Турмалин	(Na, Ca)(Mg, Al) ₃ X	40 SiO ₂	2,9—3,3	10 ⁻⁶ ; 10 ⁻¹ —1	>81	Непроводник
Флогопит	X[B ₃ Al ₃ Si ₆ (O, OH) ₃₀]	10 B ₂ O ₃	2,7—2,9	10 ⁻⁶ ; 10 ⁻¹ —1	>81	Проводник
Флюорит (плавиковый шпат)	CaF ₂	51,2 Ca	3,0—3,2	10 ⁻⁴ —10	—	»
Халькозин	Cu ₂ S	48,8 F	5,5—5,8	—	6,6—8,6	Непроводник
Халькопирит	CuFeS ₂	79,8 Cu	4,1—4,3	—	—	Проводник
Хлориты	(Mg, Fe) ₂ Al ₂ Si ₂ O ₁₀ × [OH] ₂ и др.	30,54 Fe	2,6—3,4	—	—	Непроводник
Хроммагнетит	FeFe ₂ O ₄	72,4 Fe	4,9—5,2	10 ⁻²	—	Проводник
Церуссит	PbCO ₃	77,5 Pb	6,4—6,6	—	23,1	»
Циркон	ZrSiO ₄	67,1 ZrO ₂	4,6—4,7	10 ¹² —10 ¹⁵	8—12	Непроводник
Шеелит	CaWO ₄	80,6 WO ₃	5,8—6,2	10 ¹¹	6,8	»
Шпинель	MgAl ₂ O ₄	71,8 Al ₂ O ₃	3,5—3,7	—	6,2	»
Эпидот	Ca ₂ (Al, Fe) ₂ Si ₂ O ₁₂ [OH]	до 17,0 Fe ₂ O ₃	3,3—3,4	—	—	»

ков) и влияет на заряд и ориентацию частиц в электрическом поле.

В проводниках поле, а также объемный заряд практически равны нулю, в непроводниках (диэлектриках) могут существовать электрическое поле и объемные заряды.

Частицы разной формы, помещенные в электростатическом поле, вследствие своей поляризации различным образом искажают это поле. Первоначальное однородное поле после внесения в него непроводящего тела чаще всего становится неоднородным. Поле внутри непроводника также существенно зависит от его формы. Однако в частицах, имеющих форму эллипсоида вращения, поле остается однородным. Это очевидно для предельных случаев «плоской пластинки» и «длинного цилиндра». Формула для определения напряженности внутреннего поля эллипсоида имеет вид

$$E_1 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 + d(\epsilon_2 - \epsilon_1)} E_0, \quad (1.12)$$

где ϵ_1 и ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость среды и эллипсоида; E_0 — первоначальная напряженность поля в среде, где находится эллипсоид; d — коэффициент деполаризации, определяемый отношением главных осей эллипсоида a , b и c (d может принимать три значения d_a , d_b , d_c в зависимости от того, вдоль какой оси направлено поле E_0).

Выражение (1.12) используют для расчетов зарядов частиц. Значения коэффициентов деполаризации d для эллипсоидов вращения ($a=b$) даны в табл. 1.2.

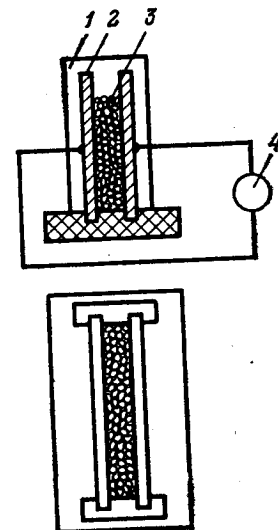


Рис. 1.8. Схема установки для оценки сопротивления минералов:
1 — изоляционная конструкция; 2 — электроды; 3 — частицы минерала; 4 — термометр

Таблица 1.2

Значения коэффициентов деполаризации d для некоторых эллипсоидов вращения

Параметры	Вид эллипсоида										
	пластина	сплюснутый эллипсоид вращения			шар	вытянутый эллипсоид вращения				бесконечная проволока	
Длина Толщина	0	0,05	0,1	0,5	1	2	4	10	20	100	∞
d	1	0,925	0,861	0,429	1/3	0,172	0,0554	0,0203	0,0068	0,004	0

ГЛАВА 2 ЗАРЯДКА ЧАСТИЦ

2.1. ЗАРЯДКА ИОНИЗИРОВАННЫМ ГАЗОМ

Необходимым условием успешной электросепарации является сообщение разделяемым компонентам электрически зарядов, которые в момент сепарации должны быть максимально различны по своей величине.

При электросепарации в настоящее время широко применяются четыре способа зарядки частиц: а) в поле коронного разряда путем осаждения на поверхности частиц ионов из объема ионизированного газа, окружающего частицу; б) индукционная путем контакта с электродом; в) термическая; г) трением — трибозарядка. Эти способы зарядки во многих конструкциях электросепараторов используются совместно. Так, электросепарация минерального сырья почти всегда сопровождается нагревом частиц и, следовательно, термическая электризация сопутствует другим способам зарядки частиц.

Способы зарядки частиц определяются в основном электрическими свойствами сепарируемых частиц, а также их формой. Зарядка ионизированным газом в поле коронного разряда является одним из самых распространенных в электросепарации способов в связи с возможностью осуществить за сравнительно небольшой промежуток времени зарядку частиц до больших зарядов и ввиду простоты технического осуществления.

Источником ионов могут служить также ионизирующее облучение, тлеющий, дуговой и скользящий разряды и микроскопические частицы меньшего размера, чем заряжаемые.

Рассмотрим зарядку в поле коронного разряда взвешенных в воздухе частиц. Ионы от коронирующего электрода под действием сил электрического поля движутся к осадительному электроду и, встречая на своем пути частицы сепарируемого материала, оседают на них.

При этом частицы материала приобретают избыточный заряд, одноименный полярности коронирующего электрода.

Поток ионов к частице определяется силой внешнего электрического поля и поля поляризации частицы, а препятствующей является сила отталкивания между ионами, осевшими на частицу, и ионами, приближающимися к ее поверхности. Зарядка частиц может происходить до тех пор, пока к ней присоединяются ионы. С увеличением времени зарядки и числа ионов, осевших на частице, возрастает напряженность поля, созданная заряжающейся частицей и направленная навстречу

основному полю. В результате этого скорость движения отрицательных ионов к частице уменьшается, т. е. уменьшается скорость ее зарядки. Когда препятствующая сила станет равной сумме притягивающих сил, зарядка прекратится.

Предпочтительной является отрицательная полярность коронирующих электродов, так как при этом корона более устойчива и пробивное напряжение значительно выше, чем при положительной короне. Кроме того, подвижность отрицательных ионов несколько больше, чем положительных, что способствует увеличению скорости зарядки частиц.

Величина заряда частиц зависит от ее геометрических размеров, проводимости, а также от того, является ли частица изолированной или имеется значительная концентрация частиц.

Предельный заряд проводящей изолированной сферы радиуса a в поле короны напряженностью E_k

$$q_{\infty} = 12\pi\epsilon_0 a^2 E_k. \quad (2.1)$$

Выражение, определяющее кинетику зарядки проводящей сферы в поле коронного разряда, выведено М. Потенье

$$q(t) = 12\pi\epsilon_0 E_k a^2 \frac{\pi n k t}{4\pi\epsilon_0 + \pi n k t}, \quad (2.2)$$

где a — радиус частицы, м; e — заряд иона, равный элементарному заряду ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); n — концентрация ионов во внешней зоне коронного разряда, ион/м³; k — подвижность ионов, м²/(В·с); t — время зарядки, с.

Подвижность атомарных и молекулярных ионов обычно равна $1-2 \cdot 10^4$ м²/(В·с), что соответствует их скорости 15—30 м/с. Представление о скорости зарядки частиц дают следующие цифры. Если принять для концентрации ионов и типичное для полей коронного разряда значение $n=10^{14}$ ион/м³, то из выражения (2.2) получаем, что за время t , равное 10^{-3} , 10^{-2} и 10^{-1} с, частица приобретет заряд, равный соответственно 6, 45 и 90% своего предельного значения.

Форма сепарируемых частиц обычно отличается от сферы. Неучет истинной формы частиц вносит погрешность в расчет их зарядов и, следовательно, в силы, действующие на частицы. При движении несферических частиц в электрическом поле возникают качественно новые процессы, не свойственные сферам, наиболее важным из которых является ориентация частиц относительно направления электрического поля и направления движения.

Частицы сепарируемого материала в ряде случаев можно представить в виде близкого по форме эллипсоида. В важном частном случае, когда одна из осей эллипсоида (например, ось a) параллельна вектору \vec{E}_k , при $b=c$ предельный заряд эллипсоида можно определить по формуле

$$\bar{q}_\infty = 4\pi\epsilon_0 E_K \frac{b^2}{d_a} \quad (2.3)$$

где d_a — коэффициент деполяризации по оси a (см. табл. 1.2).
Кинетика зарядки описывается выражением

$$q_a(t) = q_\infty \frac{enkt}{4\epsilon_0 + enkt} \quad (2.4)$$

В частном случае для круглого диска имеем

$$q(t) = 4\pi\epsilon_0 E_K a^2 \frac{enkt}{4\epsilon_0 + enkt} \quad (2.5)$$

т. е. заряд диска определяется лишь площадью, так как диск не искажает внешнего поля.

Средняя поверхностная плотность заряда эллипсоидальной частицы зависит от соотношения ее осей и ориентации частицы относительно силовых линий внешнего поля. Вытянутые частицы, ориентированные вдоль вектора напряженности \vec{E}_K , имеют плотность заряда большую, чем у шара.

При зарядке определенным образом ориентированных диэлектрических частиц в поле коронного разряда заряд не может распределиться по поверхности частиц, как это происходит у проводников. Плотность заряда на поверхности диэлектрической частицы определяется только количеством ионов, осевших в данной точке ее поверхности, поэтому заряд диэлектрической частицы, имеющей постоянную ориентацию, нельзя представить в виде определенного аналитического выражения.

Если частица имеет форму шара, то неравномерное распределение заряда на поверхности приводит к беспорядочному вращению частицы из-за действия электростатических сил. Благодаря этому избыточный заряд распределяется по поверхности частицы равномерно, т. е. как на проводнике. В этом случае заряд частиц определяется из выражения

$$q = 4\pi\epsilon_0 E_K \left(1 + 2 \frac{\epsilon_1 - 1}{\epsilon_1 + 2}\right) \frac{enkt}{4\epsilon_0 + enkt} \quad (2.6)$$

где ϵ_1 — относительная диэлектрическая проницаемость материала частицы.

В соответствии с формулами (2.1) и (2.6) предельный заряд частиц одинакового размера в зависимости от их диэлектрической проницаемости может отличаться всего в три раза, составляя условно от единицы для идеального диэлектрика ($\epsilon_1 = 1$) до трех для проводника ($\epsilon_1 = \infty$). Учитывая разброс размеров частиц, такое отношение зарядов частиц в поле коронного разряда может быть недостаточным для их разделения. Поэтому коронный разряд используется чаще всего для предварительной зарядки частиц, а сепарация частиц провод-

ников и непроводников осуществляется в зависимости от скоростей разрядки этих частиц на электрод.

Для зарядки возможно использование скользящего разряда, при котором заряжаемый материал размещается непосредственно в зоне интенсивной ионизации [6].

Скользящий разряд является специфичным видом электрического разряда газа. Он характерен тем, что развивается по поверхности тонкослойного диэлектрика 1 (рис. 2.1), у которого металлизирована или пригнана к проводящей плоскости 2 сторона, противоположная той, по которой развивается скользящий разряд. Электрод 3 подключается к источнику 4 быстросменяющегося высокого напряжения и размещается в непосредственной близости от диэлектрика 1 и может касаться его [7]. В этой конструкции при воздействии на электрод, расположенный вблизи поверхности тонкослойного диэлектрика, быстросменяющимся напряжением в результате высокой напряженности электрического поля вдоль поверхности диэлектрика начинает развиваться многоканальный скользящий разряд.

Этот разряд имеет вид ветвящихся нитей, покрывающих всю поверхность диэлектрика, и развивается при напряжениях 20—40 кВ на длину 5—20 см по диэлектрику толщиной 1—5 мм. Параметры разряда в значительной степени зависят от емкости и сопротивления диэлектрика. За один импульс длительностью 1—10 мкс скользящий разряд переносит на поверхность диэлектрика или на частицы, расположенные на ней, заряд, равный $(0,1—0,2) \cdot 10^{-2}$ Кл/см².

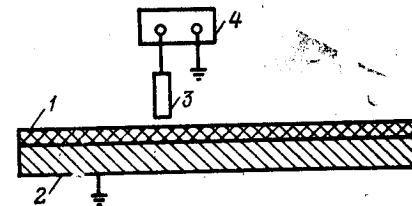


Рис. 2.1. Схема размещения электродов в устройстве для создания скользящего разряда

2.2. ЗАРЯДКА И РАЗРЯДКА ЧАСТИЦ НА ЭЛЕКТРОДЕ

Частицы, касающиеся электрода, в процессе электросепарации заряжаются в электростатическом поле (индукционная зарядка) и в поле коронного разряда. Эти два вида зарядки имеют различную физическую сущность, но используются часто совместно.

Частицы, контактирующие с электродом, приобретают заряд одноименного с ним знака в результате электростатической индукции. Если заряженная частица касается заземленного электрода, то происходит ее разрядка. Процессы зарядки и разрядки частиц индукцией имеют одинаковую физическую природу и описываются аналогичными математическими выражениями.

Скорость зарядки и разрядки частиц определяется электрическим сопротивлением, диэлектрической проницаемостью формой частиц, а также сопротивлением и емкостью зоны контакта с электродом. Для проводников этот процесс осуществляется очень быстро, а для непроводников с большим сопротивлением время зарядки и разрядки в электростатическом поле часто значительно превышает время процесса электросепарации. Со временем все частицы минералов приобретают заряд, одноименный заряду электрода.

Аналитические выражения, определяющие изменение заряда частиц, имеющих форму полуэллипсоида, получены для случая когда сопротивление контакта равно нулю. Реальные частицы можно считать близкими по форме к полуэллипсоиду (рис. 2.2)

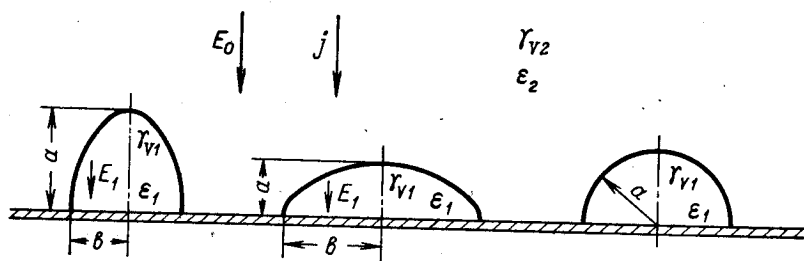


Рис. 2.2. Частицы в форме полуэллипсоида и полусферы на плоскости

Заряд частицы в форме полуэллипсоида, находящейся на проводящей поверхности в постоянном и равномерном поле с напряженностью E_0 , изменяется по экспоненциальному закону [8]

$$q(t) = q_\infty + (q_0 - q_\infty) \exp(-t/\tau), \quad (2.7)$$

где q_0 и q_∞ — начальный и предельный заряд частицы; t — текущее время; τ — постоянная времени зарядки или разрядки частиц.

Начальный заряд частицы q_0 зависит от условий зарядки до рассматриваемого момента. Возможные предельные заряды частиц будут рассмотрены ниже.

В частном случае, когда внешнее поле отсутствует, изменение заряда частиц в результате утечки заряда определяется уравнением

$$q(t) = q_0 \exp(-t/\tau). \quad (2.8)$$

Предельный заряд полусферической частицы с радиусом a , находящейся на электроде в непроводящей среде и равномерном постоянном поле с напряженностью E_0 ,

$$q_\infty = -3\pi E_0 \epsilon_0 a^2. \quad (2.9)$$

Если на электроде находится частица в форме полуэллипсоида (см. рис. 2.2) с полуосями a и $b=c$, ориентированная полуосью a вдоль поля, то для непроводящей среды имеем

$$q_\infty = -\frac{1}{d_a} \epsilon_0 \pi b^2 E_0, \quad (2.10)$$

где d_a — коэффициент деполаризации по оси a .

Величина предельного заряда таких частиц зависит только от их формы и E_0 , а знак заряда совпадает со знаком заряда электрода, на котором находятся частицы.

Отметим, что проводящий полуэллипсоид с осями $c/a = b/a = 0,5$ с большой степенью точности аппроксимирует сферическую частицу [2].

Для частиц с удельной объемной проводимостью γ_{V1} и диэлектрической проницаемостью ϵ_1 , находящейся в среде с удельной объемной проводимостью γ_{V2} и диэлектрической проницаемостью ϵ_2 , начальный q_0 и предельный q_∞ заряды соответственно равны

$$q_0 = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_1 d_a + \epsilon_2 (1 - d_a)} \epsilon_0 \pi b^2 E_0, \quad (2.11)$$

$$q_\infty = \frac{\gamma_{V2} - \gamma_{V1}}{\gamma_{V1} d_a + \gamma_{V2} (1 - d_a)} \epsilon_0 \pi b^2 E_0. \quad (2.12)$$

В этом случае предполагается, что частица до касания с электродом не имела заряда. Для воздушной среды в электростатическом поле $\gamma_{V2} = 0$ и q_∞ определяется по формуле (2.10).

Заряд проводящей частицы устанавливается сразу, однако заряд частицы с конечной проводимостью устанавливается в соответствии с законом (2.7). Например, на заземленном электроде за время, соответствующее τ , частицы разрядятся с q_0 до значения $0,632 q_0$, а за $4,6\tau$ заряд уменьшится до $0,1 q_0$.

Заряд q_∞ , определяемый по формулам (2.9) и (2.12), реально достижим в том случае, если при данной напряженности внешнего поля у выступов частицы не возникает корона. Действительно, зарядка частицы приводит к увеличению напряженности на ее поверхности и при некотором заряде у вершины частицы возникает напряженность, достаточная для ионизации.

Постоянная времени зарядки и разрядки τ определяется свойствами частицы и не зависит от напряженности внешнего поля:

$$\tau = \epsilon_0 \frac{\epsilon_1 d_a + \epsilon_2 (1 - d_a)}{\gamma_{V1} d_a + \gamma_{V2} (1 - d_a)} \quad (2.13)$$

или в воздухе при $\gamma_{V2} = 0$ и $\epsilon_2 = 1$

$$\tau = \epsilon_0 \frac{\epsilon_1 + 1 - d_a}{d_a \gamma_{V1}}. \quad (2.14)$$

По выражениям (2.11) — (2.13) возможно определять заряд и при наличии тока коронного разряда. В поле коронного разряда в окружающей частицу среде проходит электрический ток и эту среду необходимо считать проводящей с объемной проводимостью

$$\gamma_{V2} = \frac{j}{E_0}, \quad (2.15)$$

где j — плотность тока коронного разряда.

Ионы, перемещающиеся в сторону осадительного электрода от коронирующего, оседают на частицах и сообщают им избыточный заряд, знак которого совпадает со знаком коронирующего электрода. Связи с тем, что частицы имеют конечную проводимость, одновременно происходит стекание заряда тока короны и зарядка частиц от электрода, на котором они находятся. Таким образом, коронирующий и осадительный электроды заряжают частицу разноименными зарядами; окончательный знак заряда частицы и величина этого заряда зависят от электрических свойств и формы частицы.

В поле коронного разряда частицы, касающиеся электрода, сравнительно быстро приобретают предельные заряды. А так как у разных минералов электрическая проводимость может отличаться на несколько порядков, то они приобретают заряды, значительно отличающиеся по величине. Это используется при электросепарации по проводимости на барабанных коронных сепараторах. В таких сепараторах после зарядки в поле короны частицы обычно попадают в электростатическое поле, где осуществляется их разделение на ряд потоков.

Таблица 2.1
Значения постоянных времени зарядки и предельных зарядов для частиц различной формы и проводимости

$a, \text{ мм}$	$\gamma, \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$	Коронный разряд		Электростатическое поле		
		$\tau, \text{ с}$	$q_{\infty} \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$	$\tau, \text{ с}$	$q_{\infty} \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$	
0,025	10^{-12}	1,32	4,86	54,5		} -0,807
0,025	10^{-10}	0,388	0,863	0,545		
0,025	10^{-8}	0,0054	-0,784	0,00545		
0,125	10^{-12}	0,194	1,21	64,9		} -1,62
0,125	10^{-10}	0,150	0,562	0,649		
0,125	10^{-8}	0,00628	-1,53	0,00649		
0,5	10^{-12}	0,0794	0,835	95,7		} -4,04
0,5	10^{-10}	0,0734	0,465	0,957		
0,5	10^{-8}	0,0085	-3,52	0,00957		
1,0	10^{-12}	0,0527	0,451	162,0		} -9,22
1,0	10^{-10}	0,0511	0,437	1,62		
1,0	10^{-8}	0,0124	-6,88	0,0162		

Примечание. Принято $E_0=4 \text{ кВ/см}$; $j=10^{-4} \text{ А/м}$, $\epsilon_1=6,0$, $b=c=0,25 \text{ мм}$.

В табл. 2.1 приведены рассчитанные по формулам (2.7) — (2.13) некоторые параметры, определяющие процесс электросепарации по проводимости. Расчет сил для этого процесса дан в гл. 3.

Плохо проводящие частицы ($\gamma \approx 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$) имеют после зарядки знак заряда, одноименный заряду ионов, поступающих от коронирующего электрода. Частицы с большей проводимостью ($\gamma \approx 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$) быстро приобретают заряд, одноименный полюсу осадительного электрода, так как ионы коронного разряда стекают с таких частиц на осадительный электрод.

В электростатическом поле (см. табл. 2.1) на постоянные времени зарядки частиц в основном влияет электропроводность, а форма частиц влияет незначительно.

В поле коронного разряда частицы могут получить стабильный заряд, зависящий от свойств частиц, что и определяет в значительной степени эффективность процесса электросепарации по проводимости.

Как показывает опыт, частицы минералов, даже имеющие большое сопротивление, получают на заземленном электроде

в электростатическом поле (до возникновения тока короны) заряд, разноименный заряду высоковольтного электрода. Нами совместно с В. В. Ермаковым измерены величины зарядов естественных зерен микроклина, плагиоклаза и кварца крупностью 0,63—0,8 мм, находившиеся в течение 0,15 с на вращающемся заземленном хромированном цилиндре. Против цилиндра на расстоянии 37 мм ($\alpha=50^\circ$) устанавливался высоковольтный цилиндрический электрод диаметром 25,4 мм, подключенный к источнику постоянного высокого напряжения.

Заряд частиц определялся после их падения с заземленного цилиндра в клетку Фарадея, подключенную к электрометру ВК 2-16. Температура частиц и окружающего воздуха $+20^\circ \text{ С}$, относительная влажность 80%. Как видно из рис. 2.3, величина и знак заряда микроклина и плагиоклаза сильно зависят от напряженности элект-

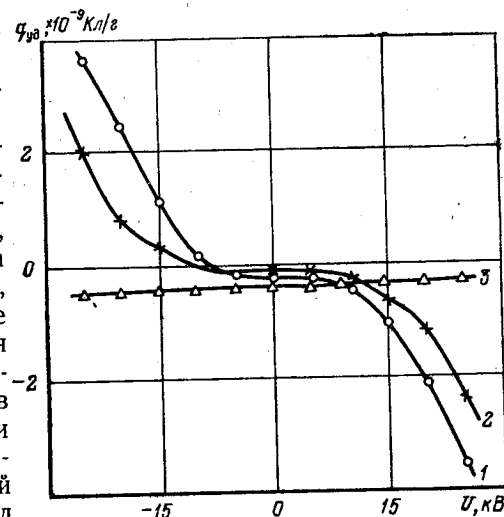


Рис. 2.3. Зависимость удельных зарядов минералов от напряжения между электродами:

1 — микроклин; 2 — плагиоклаз; 3 — кварц

рического поля и полярности высоковольтного электрода, а величина и знак заряда кварца практически остаются постоянными.

Аналогичная перезарядка частиц микроклина и плагиноклаза наблюдается при изменении времени нахождения их в электрическом поле, что проверялось при различных частотах вращения заземленного электрода, его диаметре и расстояниях между высоковольтным и заземленным электродами.

Скорость индукционной разрядки частиц можно регулировать модификацией поверхности электрода. В работе [9] предлагается для разделения минералов с высокой электрической проводимостью (от 10^{-14} до 10^{-11} Ом $^{-1}$ м $^{-1}$) покрывать осадительный электрод барабанного коронного сепаратора полупроводниковыми пленками, имеющими сравнительно высокую механическую прочность. Если разделяемые минералы являются полупроводниками типа *n* и *p*, т. е. имеют различные типы проводимостей, то, подобрав поверхности электрода с проводимостью соответствующего типа, можно осуществить разделение минералов. Соединения типа *p-n* пропускают электрический ток в одном направлении от *p* к *n*.

Полупроводниковый эффект был установлен для барабана, покрытого слоем окиси меди и окиси алюминия. Было осуществлено разделение галенита и магнетита, а также колумбита и ильменита на анодированном алюминиевом электроде и электроде, покрытом окисью алюминия. Деление этих минералов на алюминиевом барабане не наблюдалось [9].

2.3. ЗАРЯДКА ЧАСТИЦ ТРЕНИЕМ

Использование электризации трением, или трибозарядки, позволяет осуществить сепарацию материалов, компоненты которых мало отличаются между собой по электрической проводимости. В работах, опубликованных по этому вопросу, часто приводятся противоречивые данные как в отношении величины приобретаемого заряда, так и его знака. Это объясняется тем, что электризация трением существенно зависит от условий среды, наличия и характера примесей, содержащихся в обоих контактирующих материалах, состояния их поверхностей и т. д. Одни и те же минералы могут в одних условиях заряжаться положительно, а в других — отрицательно.

Трибозарядка различных компонентов сепарируемых материалов возможна двумя путями: а) при контакте и трении частиц материала между собой, в результате чего различные материалы приобретают противоположные заряды; б) в результате контакта частиц с поверхностью, вещество которой выбрано из того расчета, что разделяемые компоненты при контакте с этой поверхностью получают заряды, различные по величине и, желательнее, по знаку. Величину и знак приобре-

того заряда можно регулировать условиями нагрева материала и окружающей среды, влажностью среды, реагентной обработкой.

Эффект трибозарядки является следствием обмена зарядов между соприкасающимися поверхностями и, как считает ряд исследователей [10], связан с образованием в месте контакта двойного электрического слоя. До контакта энергетическое состояние поверхностей характеризуется определенным равновесным состоянием. Контакт приводит к нарушению энергетического состояния поверхностей, так как в соприкосновении входят поверхности, имеющие разный уровень поверхностной энергии. Вновь образовавшийся двойной электрический слой характеризуется новым энергетическим состоянием, являющимся причиной перераспределения носителей зарядов между контактирующими телами. Толщина двойного электрического слоя соответствует межатомным расстояниям и равна нескольким ангстремам. При разрыве контакта на каждой частице образуются некомпенсированные разноименные заряды. Величина заряда определяется кинетикой процессов, происходящих при образовании и разрыве двойного электрического слоя в месте контакта частиц. Явления, относящиеся к механизму электризации при контакте, осложняются наличием пленок влаги, электролитическими эффектами, загрязнением поверхностей.

Перенос зарядов — очень быстрый процесс. Время, необходимое для образования двойного слоя, почти не зависит от удельной проводимости частицы, но зависит в основном от числа электронов (или ионов), находящихся в месте контакта.

Для электризации минералов с очищенной от посторонних примесей поверхностью достаточно только контакта. Однако трение о другую поверхность позволяет очистить минералы от «грязи» и увеличить площадь контакта, что приводит к повышению заряда частичек. В связи с тем, что переход зарядов обусловлен контактом и последующим разделением двух поверхностей, термины «электризация трением» и «трибозарядка» не отражают сущности явления.

Исследования закономерностей трибозарядки кварца, кальцита, флюорита, плагиноклаза и ортоклаза при их трении о латунную, стальную, алюминиевую, хромированную и другие подложки показали [11], что трибозарядка минералов-диэлектриков определяется разницей работ выхода электронов минерала и металлической подложки. Электроны переходят от вещества с меньшей работой выхода электрона к веществу с большим ее значением, что определяет знаки зарядов при контакте веществ. Вещество, для которого величина работы выхода электрона больше по сравнению с контактирующей парой, заряжается отрицательно, и наоборот. В отдельных случаях (для плагиноклаза, ортоклаза, кварца) имеет место линей-

ная зависимость величины трибозаряда от разности работ выхода электронов контактирующих пар. В общем же случае не наблюдается строгой линейной зависимости между величиной трибозаряда и разностью работ выхода электрона минерала и подложки.

На примере природного кварца ряда месторождений с различным содержанием и различными формами вхождения примесного алюминия показано [11], что трибозарядка зависит от степени дефектности кристаллической решетки. Сам акт трибозарядки, заключающийся в многократном повторении контакта минерала с электризирующей поверхностью и разрыва контакта, несмотря на небольшую силу соударений является одним из видов энергетического (деформационного) воздействия на кристаллическую решетку минерала. Возникновение новых дефектов обуславливает появление дополнительных поверхностных состояний и, как следствие, изменение значения работы выхода электрона.

Для трибозарядки частиц перед электросепарацией используются вибропитатель, неподвижная наклонная пластина, вращающийся барабан и зигзагообразный питатель. Интенсивная электризация частиц наблюдается в псевдооживленном слое при распылении.

При измерении трибозарядов частиц используют клетку Фарадея и вольтметр — электрометр (рис. 2.4) с высоким входным сопротивлением. Клетка Фарадея представляет собой металлическую банку, экранированную снаружи металлическим цилиндром; банка подключается к электрометру, а цилиндр заземляется. Изоляция между банкой и цилиндром выбирается из условия получения большого времени разряда измерительного контура.

Заряд частиц, сыпавшихся в банку, подсчитывается по формуле

$$q_{уд} = \frac{CU}{m}, \quad (2.16)$$

где $q_{уд}$ — удельный заряд частиц, Кл/г; C — емкость измеритель-

ного контура, Ф; U — напряжение, показанное электрометром, В; m — масса пробы минерала, г.

Емкость измерительного контура C включает емкость прибора, клетки Фарадея, проводов.

В случае измерения заряда отдельной частицы методом электрометра частица берется из общей навески иглой с изолированной ручкой и помещается в клетку Фарадея [12]. Величина заряда определяется вольтметром. Заряды, наводимые на иглу, периодически снимаются при протирке иглы спиртом.

Другим методом измерения зарядов является регистрация траектории частиц при свободном падении в однородном электрическом поле плоских электродов, которые устанавливаются вертикально. Определение величин зарядов таким методом описано в работе [12], оно выполнено с учетом сопротивления среды. Траектория движения частиц регистрировалась с помощью фотоаппарата, затвор которого в процессе съемки оставался открытым. Для освещения межэлектродного промежутка использовался импульсный источник света (кварцевая лампа) с частотой вспышек 200 Гц и энергией 200 Дж. Таким образом, на фотопленке фиксировалось положение частиц через определенные промежутки времени. Это давало возможность определить скорости движения частиц и из уравнения сил, действующих на частицу в однородном электрическом поле, рассчитать ее заряд.

Результаты определения величин зарядов, выполненные методами электрометра и регистрации траектории частиц при свободном падении в электрическом поле, приведены на рис. 2.5 [12]. Частицы различной крупности брались из естественной смеси минералов, подвергнутых термической обработке, принятой при электросепарации этих минералов (нагреву до 180° С и последующему охлаждению до 120—140° С при одновременном перемешивании). На рис. 2.5 точками показаны среднеарифметические значения зарядов, взятые на основании 30—50 измерений, а в виде вертикальных отрезков нанесены среднеквадратические отклонения. Как видно из рис. 2.5, результаты измерений, выполненные двумя методами, практически совпадают.

Исследование трибозарядки сыпучих материалов часто осуществляется с помощью вибропитателя (см. рис. 2.4). Частицы перемещаются по плоскости, прикрепленной к упругим пластинам и соединенной с электромагнитным или электромашинным вибратором. В результате вибрации частицы перемещаются от бункера к концу вибропитателя, одновременно осуществляется и перекачивание частиц. Величина и знак заряда частиц зависят от материала плоскости вибропитателя, называемой подложкой. Например, частицы плавикового шпата приобретают отрицательный заряд на магнитной подложке и положительный — на алюминиевой, анодированной алюминием и покрытой сернистой медью [13]. Сферит получает отрицательный заряд при вибрации на любой из указанных подложек.

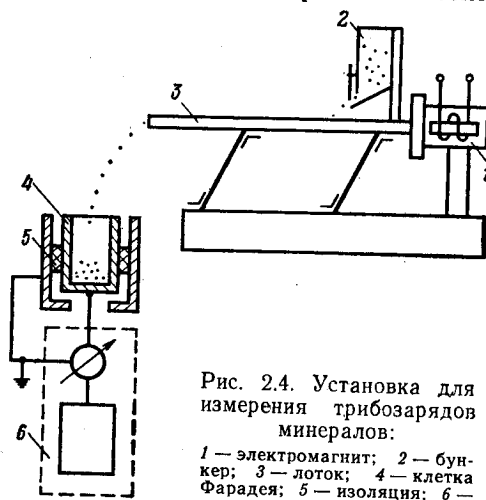


Рис. 2.4. Установка для измерения трибозарядов минералов:

1 — электромагнит; 2 — бункер; 3 — лоток; 4 — клетка Фарадея; 5 — изоляция; 6 — электрометр

Величины зарядов частиц некоторых минералов при трибо- зарядке приведены в табл. 2.2 [14].

Для каждой пары минерал—металл было взято более 2000 частиц крупностью 1,4—1,2 мм. Заряд, приобретаемый

Таблица 2.2

Заряды частиц минералов при трении о металлы

Минерал	Заряды, 10^{-11} Кл			Минерал	Заряды, 10^{-11} Кл		
	Никель	Медь	Золото		Никель	Медь	Золото
Флюорит	-0,41	+0,55	+0,45	Галенит	-0,024	-0,035	-0,044
Кальцит	-0,63	+0,53	+0,46	Пирит	-0,018	-0,004	-0,037
Кварц	-0,25	+0,20	+0,56	Сфалерит	-0,036	-0,005	+0,001
Барит	+0,26	+0,58	+0,61				

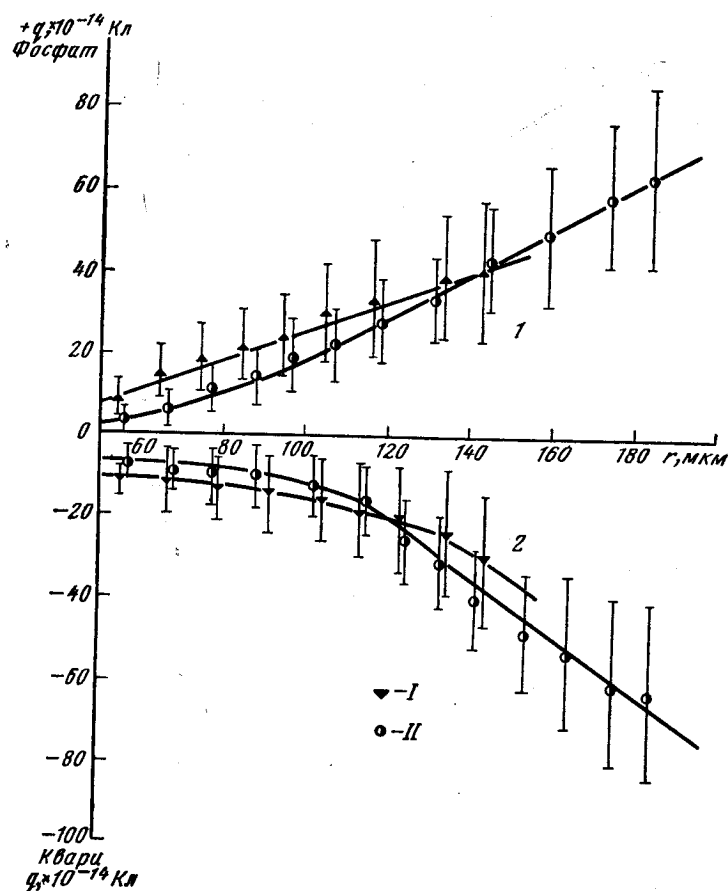


Рис. 2.5. Зависимость трибоэлектрического заряда зерен кварца и фосфата от их радиуса:

1 — заряды зерен фосфата, измеренные электрометром I и методом регистрации траекторий II; 2 — заряды зерен кварца, измеренные электрометром I и методом регистрации траекторий II

отдельной частицей, определяется частотой и длительностью взаимодействия с другими частицами и с транспортирующей системой. По этой причине наблюдается разброс величин зарядов среди частиц, имеющих даже одинаковые свойства.

Условием устойчивой трибозарядки на вибропитателе является заземление подложки и выполнение ее из проводящего материала. На изоляционной и изолированной подложках при многократном прохождении частичек накапливаются свободные заряды. Это нарушает процесс трибозарядки, так как происходит переход свободных зарядов на частицы.

С помощью вибропитателя обеспечиваются условия, при которых осуществляется трибозарядка частиц сепарируемого материала. Для этого поперек направления движения материала на вибропитателе устанавливается одна или несколько перегородок. Такие перегородки позволяют осуществить перемешивание материала, трение частичек друг о друга и непрерывную смену материала перед перегородкой.

Максимальные заряды частицы приобретают при определенных условиях перекачивания. Электризация частиц до величины зарядов, указанных в табл. 2.2, происходит при интенсивной вибрации, обеспечивающей перекачивание и отрыв частиц от подложки. Увеличение амплитуды вибрации приводит к уменьшению промежутков времени касания, разрушению поверхностных пленок и большей площади поверхности контакта благодаря более высокому давлению.

Рассмотрим зарядку частиц при ее перемещении на вибропитателе. После каждого соприкосновения и отрыва от подложки на поверхности частицы образуется небольшой заряженный участок. При перекачивании или подбрасывании частицы этот заряженный участок оказывается удаленным от места контакта, и частица касается подложки новым участком. Чтобы увеличить заряд, необходимо обеспечить касание частицы во многих точках, хотя при втором и последующих касаниях частица приобретает меньшие заряды вследствие изменения потенциала всей частицы.

Имеет значение и время, через которое частица касается подложки в каждой новой точке. Когда заряженный участок удаляется от места контакта, для него исчезают условия, которые

приводили к его зарядке. Частицы имеют конечное сопротивление, и удаленные от места контакта заряды стекают через место контакта на подложку. Процесс разрядки определяется теми же свойствами частиц, которые были рассмотрены при разрядке частиц на электроде — сопротивлением и формой частиц.

В процессе перекачивания частицы устанавливается равновесие между величиной приобретенного трибозаряда и зарядом, теряемого из-за проводимости частицы. Если частица находится без движения на заземленной подложке, со временем ее трибозаряд уменьшается.

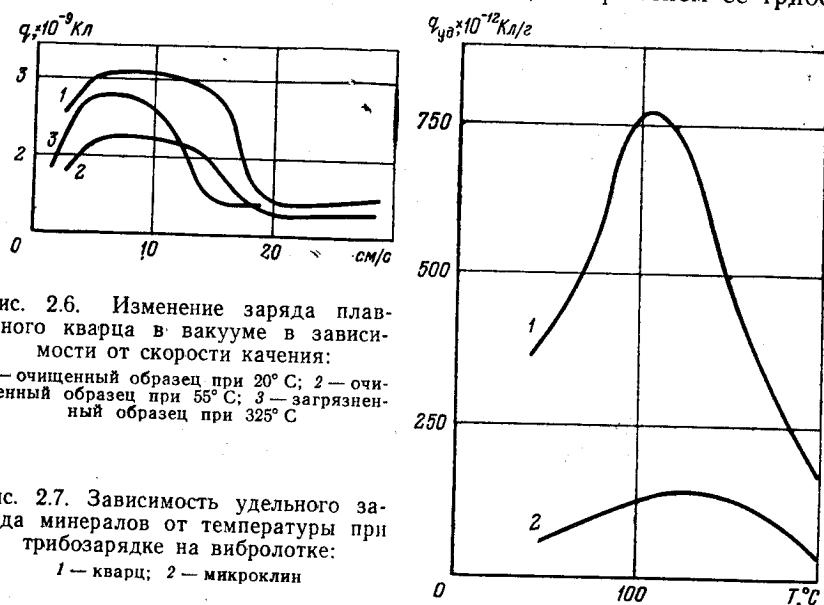


Рис. 2.6. Изменение заряда плавленого кварца в вакууме в зависимости от скорости качения:

1 — очищенный образец при 20°C ; 2 — очищенный образец при 55°C ; 3 — загрязненный образец при 325°C

Рис. 2.7. Зависимость удельного заряда минералов от температуры при трибозарядке на вибролотке:

1 — кварц; 2 — микроклин

заряд уменьшается и при отрыве от подложки может быть обнаружен заряд, определяемый только единичным касанием.

В работе [10] показано, что при очень высоких скоростях качения частицы ее заряд вновь уменьшается (рис. 2.6). Возможно, это связано с возникновением электрической искры между частицей и подложкой.

Хорошо проводящие минералы, такие как галенит, пирит, гематит, сохраняют на металлических подложках очень небольшие заряды из-за большой утечки приобретенного заряда, в то время как на изолирующих материалах эти минералы сохраняют гораздо большие заряды. С другой стороны, плохо проводящие минералы — кварц, полевые шпаты, флюорит, доломит — сохраняют значительные заряды даже в контакте с металлами.

В производственных условиях материал перед поступлением в сепаратор проходит некоторый путь, на протяжении которого

частицы приобретают трибозаряды, так как они трутся друг о друга и о поверхность транспортирующих, классифицирующих и других устройств. Если компоненты сепарируемого материала получают существенно отличные и достаточные по величине трибозаряды, то они могут быть разделены на электросепараторах.

К основным факторам, влияющим на степень электризации частиц при трибозарядке, относятся температура и влажность окружающей среды и контактирующих материалов. При нагреве изменяются электрофизические свойства минералов и одновременно происходит разрушение поверхностной пленки влаги, что позволяет твердой частице заряжаться при непосредственном контакте ее с подложкой. Разницу между величинами зарядов сепарируемых материалов можно увеличить, применяя нагрев материалов (рис. 2.7). Последнее обстоятельство широко используется при электросепарации. Однако необходимо учитывать, что для каждого минерала существует определенная температура, при которой величина заряда оказывается наибольшей.

2.4. ДРУГИЕ ВИДЫ ЗАРЯДКИ

Зарядка при электрическом разряде с самих частиц. Этот вид зарядки начали исследовать недавно, хотя, по-видимому, он имеет место во многих процессах электросепарации.

В работе [16] показано, что зарядка удлиненных частиц может быть осуществлена в электростатическом поле при отсутствии контакта частиц с электродом. Если частица поме-

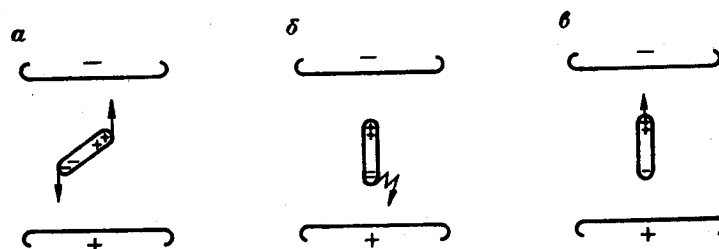


Рис. 2.8. Зарядка частиц в электростатическом поле при отсутствии контакта с электродом:

а — ориентация частиц в направлении силовых линий поля; б — разряд с одной из вершин частицы; в — движение волокна к электроду

щается в электростатическое поле, то в начальный момент времени поле внутри нее отлично от нуля. Вследствие проводимости в частице начинает протекать ток, приводящий к накоплению на противоположных концах ее свободных зарядов разных знаков. Наиболее эффективно разделение свободных зарядов происходит в волокнообразных телах, ориентированных вдоль силовых линий внешнего поля (рис. 2.8, а).

Этот процесс приводит к повышению напряженности электрического поля волокна и может завершиться самостоятельным разрядом с одного из концов (рис. 2.8, б). В результате волокно приобретает избыточный заряд знака другого конца и начинает двигаться к одному из электродов (рис. 2.8, в). Разряд возникает раньше на одном из концов частицы из-за их неоднородной формы или вследствие того, что при отрицательной полярности ионизация начинается при меньших значениях напряженности, чем при положительной.

Одних лишь связанных (поляризационных) зарядов недостаточно для того, чтобы вызвать ионизацию. На концы частицы должны стечь свободные заряды, что может произойти через некоторое время, зависящее от сопротивления частицы. Таким образом, необходимы два условия для осуществления зарядки волокон, движущихся в воздушной среде через область электрического поля. Во-первых, нужна определенная величина напряженности внешнего поля, достаточная для того, чтобы вблизи вершин волокна напряженность поля могла достигнуть значения, соответствующего началу ионизации. Во-вторых, время, при котором достигается напряженность поля начала ионизации на частице, было бы соизмеримо со временем пребывания волокон в области поля.

Установлено, что для хлопковых волокон практически приемлемое время, необходимое для создания условий возникновения разряда с вершин, осуществляется при повышенной влажности. Это время составляет менее 0,01 с при влажности 65% и напряженности внешнего поля 1—3 кВ/см.

Явление самостоятельного разряда частиц позволяет осуществить в воздухе зарядку и управление движением потока волокнообразных частиц.

Биполярная зарядка на электродах. Механизм биполярной зарядки на электродах похож на зарядку при электрическом разряде в воздухе, он установлен при исследовании поведения хлопковых волокон в электрическом поле [16].

При касании электрода ориентированной вдоль силовых линий частицей в ней происходит разделение свободных зарядов. Вблизи электрода на конце частицы накапливается заряд q_2' , разноименный полярности электрода; этот заряд вызывает силу зеркального отображения, удерживающую частицу у электрода. Между частицей и электродом может находиться диэлектрический слой, например окисная пленка на электроде или другая частица (рис. 2.9, а). Наличие такого слоя не позволяет в первый момент стечь заряду q_2' , накопление этого заряда приводит к усилению напряженности поля в диэлектрическом слое. При некотором значении этой напряженности через диэлектрический слой может проходить электрический ток и часть заряда q_2' будет нейтрализоваться (рис. 2.9, б). В результате

частица приобретет избыточный заряд $q_{изб}$ знака заряда q_1 и величины $q_{изб} = q_1 - q_2$. Снижение заряда q_2 может привести к отрыву частицы от электрода (рис. 2.9, в).

Оценка величин биполярных зарядов [16] хлопковых волокон длиной 15 и 25 мм, диаметром 20 мкм при напряженностях внешнего электрического поля $E_0 = 0,25—10$ кВ/см и влажности окружающего воздуха 50% показала, что эти заряды равны примерно 10^{-11} Кл. Указанная величина биполярных зарядов хлопковых волокон в несколько раз выше избыточных и на несколько порядков превышает поляризационные.

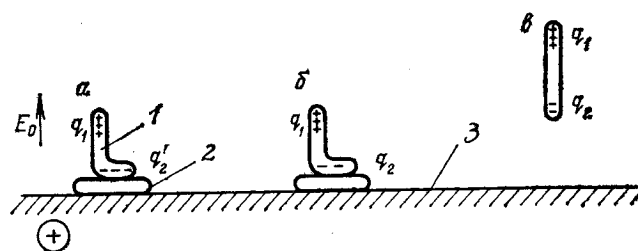


Рис. 2.9. Механизм биполярной зарядки на электроде:
1 — волокно; 2 — электрод; 3 — диэлектрик

Биполярная зарядка волокон приводит к тому, что электрические силы, действующие на частицы после их отрыва от электрода, на 2—3 порядка превышают вес частиц. Скорости движения и заряды волокон, оторвавшихся от отрицательного электрода, в 1,3—1,5 раза ниже соответствующих значений для волокон, получивших заряд на положительном электроде. Последнее обстоятельство связано с различием напряженностей возникновения разряда с вершин разных полярностей.

Зарядка минералов при деформации и разрушении. Электрические заряды на поверхности минералов могут возникнуть при различных механических напряжениях и разрушениях. Наиболее полно изучен пьезоэлектрический эффект, наблюдаемый при растяжении или сжатии некоторых минералов: гранитов, гнейсов и кварцитов. Необходимым, но недостаточным условием существования пьезоэлектричества является отсутствие центра симметрии в диэлектрическом кристалле [1].

Электризация минералов при разрушении применительно к электросепарации мало изучена. В работе [17] описано возникновение электрических зарядов в процессе разрушения микроклина и ортоклаза. Исследования проводились с целью объяснения электрических феноменов во время землетрясений таких, как свечение воздуха над поверхностью холмов за несколько секунд до ощутимых толчков и после них. Кристаллическая решетка полевых шпатов имеет центр симметрии, что исключает возможность существования в них пьезоэлектриче-

ского эффекта. Деформации, сопровождающиеся возникновением микротрещин, приводят к образованию на различных гранях микроклина и ортоклаза зарядов одинакового знака (обычно плюса) на всей поверхности образца. При нагружении и разрушении образца полярность зарядов не меняется. Измеряется электрический ток, возникающий при деформации кристалла. Увеличение нагрузки, приводящее к возникновению микротрещин, вызывает появление электрического тока, который становится максимальным для нагрузок, близких к нагрузкам, разрушающим образец.

Пироэлектрическая зарядка частиц. В небольшом числе кристаллов изменение температуры приводит к возникновению на одном конце кристалла положительного заряда, а на противоположном конце — отрицательного заряда. Этот пироэлектрический эффект связан с влиянием температуры на образование упругих механических натяжений в кристаллах, т. е. с пьезоэлектрическим эффектом. Некоторые кристаллы, у которых обнаруживается пироэлектрический эффект, характеризуются отсутствием центра симметрии и двойникового сростания. Таковы, например, каламин, турмалин, биотит, кварц.

Пироэлектрическую зарядку можно наблюдать при контакте нагретых частичек кварца с холодной металлической поверхностью. При быстром охлаждении кварц поляризуется и прилипает к поверхности. Если на охлаждаемый металлический барабан, который приводится во вращение, подавать, например смесь нагретых частичек кварца и полевого шпата, то полевого шпата, не обладающий пироэлектрическим эффектом, будет спадать с вращающегося барабана и, таким образом, отделится от налипшего на барабан кварца.

Зарядка при фотоэмиссии электронов. Непосредственное использование фотоэлектрического эффекта для разделения минералов было показано на сфалерите ZnS [18]. Фотоэмиссионной способностью обладают, по-видимому, многие из окислов, карбонатов, сульфидов и арсенидов. В наименьшей степени фотоэмиссионной способностью обладают окислы кремния, алюминия и минералы с высоким содержанием этих окислов.

Зарядка измельченных до крупности —43 мкм и диспергированных на звуковых частотах частиц сфалерита осуществлялась с помощью ртутной и дейтериевой ламп. Сфалерит при облучении получал положительный заряд, в то время как при трибоэлектрической зарядке по алюминиевой подложке — отрицательный. Фотоэмиссия электронов происходила в воздушной среде без использования реагентов или подогрева, при этом большое число частиц получали заряды за одну экспозицию.

ГЛАВА 3

СИЛЫ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ

3.1. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ТОЧЕЧНЫЕ ЗАРЯДЫ

Силы электрического поля могут перемещать частицы в пространстве и ориентировать их. Направление и скорости перемещения и ориентации зависят от свойств электрического поля и самой частицы. Следствием этого может явиться отделение частиц с разными свойствами друг от друга.

Частицы минерального сырья, поступающие на электросепарацию, имеют разнообразную и сложную форму с острыми краями, выступами, плоскими гранями под разными углами и т. д. Аналитические методы расчета разработаны только для частиц простейших форм, в частности шара, эллипса, которые являются грубым приближением к реальным частицам. Однако, как показывает практика, оценка электрических сил для идеализированных частиц с различными электрическими свойствами и различной формой позволяет во многих случаях правильно предсказать и оценить возможности сепарации материалов, выбрать конструкцию сепараторов и их отдельных узлов.

В случае, когда линейные размеры заряженных частиц весьма малы по сравнению с расстояниями между ними, частицы удалены от электродов и когда в пределах размера частицы поле однородно, частицу можно принять за точку с зарядом q . Электрическая сила, действующая на точечный заряд или применительно к реальным частицам на так называемый избыточный заряд, в большинстве случаев является определяющей при электросепарации.

Сила взаимодействия двух заряженных тел прямо пропорциональна произведению зарядов q_1 и q_2 и обратно пропорциональна квадрату расстояния R^2

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon_0 \epsilon A \pi R^2} \quad (3.1)$$

Формула (3.1) экспериментально установлена Кулоном (1785 г.) для точечных зарядов.

Сила, действующая на точечный заряд во внешнем электрическом поле напряженностью E , определяется по формуле (1.1). Направление действия силы F зависит от знака зарядов и направления вектора напряженности \vec{E} .

В общем случае пользование выражениями (3.1) и (1.1) весьма усложняется, так как необходимо предварительно подразделить заряды на элементарные части, которые можно было бы считать точечными, и искать результирующую силу как

геометрическую сумму сил взаимодействия этих элементарных частей зарядов.

При электросепарации наряду с электрическими на частицы действуют также другие силы. Некоторые из них будут рассмотрены в этой главе. В большинстве случаев приходится, в частности, учитывать начальное ускорение частиц и силу тяжести.



Рис. 3.1. Движение заряженной частицы в однородном электрическом поле с учетом силы тяжести

номерно ускоренного движения под действием силы $F_l = qE$ по оси x со скоростью

$$v_x = v_{0x} + \omega t$$

и равномерно ускоренного движения под действием силы $F_T = mg$ по оси y со скоростью

$$v_y = v_{0y} + gt,$$

где v_{0x} и v_{0y} проекции скорости v_0 на соответствующие оси.

Ускорение ω , вызванное силой F_l ,

$$\omega = \frac{F_l}{m} = \frac{qE}{m}.$$

Время t , в течение которого частица двигалась в поле, можно определить, зная высоту падения частицы h :

$$h = v_{0y}t + \frac{gt^2}{2}. \quad (3.2)$$

Отклонение от первоначальной траектории

$$l = v_{0x}t \pm \frac{\omega t^2}{2}.$$

$$l = v_{0x}t \pm \frac{qEt^2}{2m}. \quad (3.3)$$

Уравнения (3.2) и (3.3) позволяют определить l в момент выхода частицы из электрического поля в точке a .

Скорость движения частицы в этот момент равна

$$v_a = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}.$$

Угол α между вертикальной осью и конечной траекторией частицы определяется по формуле

$$\alpha = \text{arctg} \frac{v_y}{v_x}.$$

Вне поля путь частицы будет прямолинейным по касательной к траектории в точке a .

Если частица попадает в электрическое поле с нулевой начальной скоростью, то отклонение частицы

$$l = \frac{qEh}{2gm}.$$

При выводах было сделано допущение, что однородность поля не нарушается у его границ (краевой эффект не учитывался), а также не учитывалось сопротивление среды.

3.2. ДИПОЛИ ВО ВНЕШНЕМ ПОЛЕ

В результате биполярной зарядки или диэлектрической поляризации на противоположных концах частицы образуются разноименные заряды. Такие частицы можно рассматривать как диполи, т. е. как заряды q и $-q$, жестко связанные между собой и смещенные на расстояние l друг от друга.

На рис. 3.2 показаны силы, действующие на диполь в однородном поле. Эти силы равны по величине и направлены в противоположные стороны, поэтому они взаимно уравновешивают друг друга. Момент сил можно определить по формуле

$$M = qEl \sin \alpha. \quad (3.4)$$

Из формулы (3.4) следует, что диполь стремится повернуться в электрическом поле вдоль линий напряженности внешнего поля, так как в этом положении $\alpha = 0$ и $M = 0$.

В неоднородном внешнем поле на заряды $+q$ и $-q$ диполя действуют разные силы qE и $-qE'$ (рис. 3.3), так как напряженности внешнего поля E и E' в местах расположения зарядов q и $-q$ разные. Суммарная сила

$$\vec{F} = q(\vec{E}' - \vec{E}) = ql \frac{\partial \vec{E}}{\partial l}.$$

Сила F прямо пропорциональна величине заряда q и разнице между напряженностями поля в местах расположения зарядов q и $-q$, т. е. зависит от степени неоднородности поля и длины диполя. Однако направление поля, т. е. изменение полярности электродов, не влияет на силу F . Эта сила в неоднородном поле направлена в сторону наиболее быстрого возрастания E и стремится переместить диполь в места с повышенной

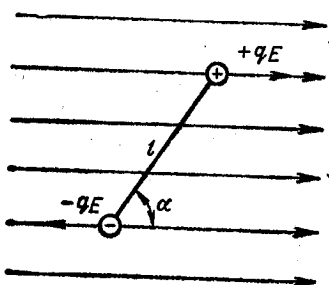
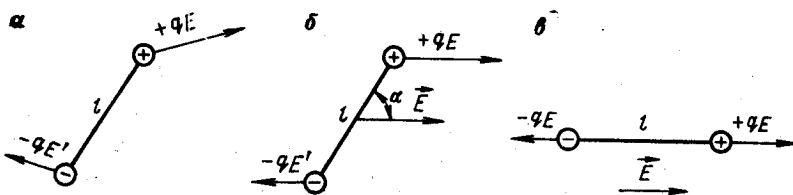


Рис. 3.2. Диполь в однородном поле

Рис. 3.3. Диполь в неоднородном поле: а, б — неустойчивые положения диполя; в — устойчивое положение диполя



напряженностью. В частном случае, когда напряженность поля меняется только по величине, но не по направлению (см. рис. 3.3, б, в), сила максимальна, если диполь параллелен полю ($\alpha=0$); сила равна нулю, если диполь расположен перпендикулярно к направлению поля ($\alpha=90^\circ$).

Одновременно с движущей силой F на диполь действует и вращающий момент M . Поэтому диполь будет поворачиваться и поступательно перемещаться во внешнем неоднородном поле. Так, если в начальный момент ось диполя составляет угол 90° с направлением внешнего неоднородного поля, то диполь сначала начнет поворачиваться, так как в этом положении движущая сила F равна нулю, а вращающий момент имеет максимальное значение. Затем диполь будет продолжать вращаться и одновременно начнет втягиваться в места с наибольшей напряженностью поля. В тот момент, когда диполь ориентируется вдоль поля (см. рис. 3.3, в), вращающий момент обратится в нуль, а движущая сила будет иметь максимальное значение.

Заряженные частицы типа волокон стремятся не только расположиться вдоль линий электрического поля, но и распрямиться в результате наличия разноименных зарядов на кон-

цах частицы, которое приводит к возникновению растягивающих сил.

Диполи взаимодействуют друг с другом, а также с заряженными частицами, причем направление действия сил зависит от ориентации диполей. Если частицы обращены друг к другу разноименными полюсами, происходит их рассеивание, если разноименными — слипание.

Н. А. Фукс [19] показал, что слипание поляризованных частиц становится возможным при условии

$$E_0 r^{3/2} \approx 1,2 \cdot 10^{-6},$$

где E_0 — напряженность внешнего электрического поля, кВ/см; r — радиус сферической частицы, см.

Отсюда следует, что для электростатического слипания частиц радиусом $r=50$ мкм достаточно напряженность внешнего поля всего 0,1 кВ/см.

Длительное пребывание в одном воздушном потоке поляризованных частиц ухудшает электросепарацию, так как упорядоченное движение частиц, вызванное взаимодействием их зарядов и внешнего электрического поля, нарушается силами взаимодействия между самими сепарируемыми частицами.

3.3. СИЛЫ В НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Представление частиц в виде диполей не всегда оказывается достаточным для качественной оценки движения поляризованных и биполярно заряженных частиц. Воздействие поля на реальную частицу приводит к возникновению зарядов, величина и распределение которых зависят от свойств поля, среды и частицы.

В простейшем случае идеального диэлектрика, имеющего форму шара, сила, обусловленная поляризацией диэлектрика в неоднородном электрическом поле, зависит от объема частицы, соотношения между диэлектрическими проницаемостями среды ϵ_2 и частицы ϵ_1 , степени неоднородности электрического поля

$$\vec{F} = 4\pi\epsilon_0\epsilon_2 a^3 \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2} E \text{grad} |\vec{E}|, \quad (3.5)$$

где $\text{grad} |\vec{E}|$ — производная напряженности электрического поля в направлении наиболее быстрого возрастания E ; a — радиус частицы.

При этом предполагается, что частицы ориентированы вдоль поля и что неоднородностью поля в пределах размера частицы можно пренебречь. В однородном поле сила F будет равна нулю, так как при этом $\text{grad} |\vec{E}| = 0$.

Силы, обусловленные неоднородностью электрического поля, действуют на частицы независимо от того, имеют ли частицы избыточные заряды или нет.

Из формулы (3.5) следует, что если диэлектрическая проницаемость частицы больше, чем диэлектрическая проницаемость окружающей ее среды ($\epsilon_1 > \epsilon_2$), частица будет двигаться в те места поля, где напряженность больше (рис. 3.4); в противном случае ($\epsilon_1 < \epsilon_2$) сила изменит свой знак и частица будет двигаться в места поля с меньшей напряженностью. В воздухе для всех частиц эта сила направлена в сторону усиления поля. Силы, действующие на избыточный заряд частицы, направлены в сторону электродов, тогда как силы, обусловленные разницей

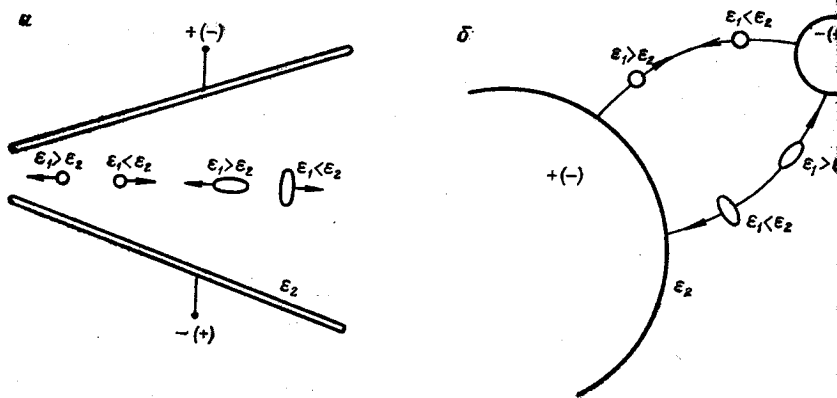


Рис. 3.4. Направление действия сил на частицы с различной диэлектрической проницаемостью в неоднородном электрическом поле с пластинчатыми (а) и сферическими (б) электродами

в диэлектрических проницаемостях, могут иметь другое направление.

Отметим, что если $\epsilon_1 > \epsilon_2$, то диэлектрическая частица, имеющая форму эллипсоида, устанавливается своей длинной стороной вдоль поля. Если же $\epsilon_1 < \epsilon_2$, то произойдет обратное явление — частица станет поперек поля (см. рис. 3.4).

При оценке сил, действующих на поляризованные частицы, следует также учитывать соотношение между временем установления поляризации и временем пребывания частиц в постоянном или переменном поле сепаратора. Время установления диэлектрической поляризации составляет обычно 10^{-14} — 10^{-4} с, т. е. диэлектрическая поляризация происходит практически мгновенно по сравнению с процессом электросепарации. Однако реальные частицы минералов и среда, в которой осуществляется процесс сепарации, имеют определенную электрическую проводимость. Это приводит к тому, что на границе раздела частица — среда происходит сравнительно медленное накопление свободных электрических зарядов, что в свою очередь вызывает изменение плотности связанных зарядов на поверхности частицы

изменение со временем силы, действующей на поляризованную частицу в неоднородном поле.

Со временем распределение зарядов по поверхности частицы определяется соотношением проводимостей частицы и среды, и сила, действующая на частицу, имеющую форму шара, становится равной

$$\vec{F} = 4\pi\epsilon_0\epsilon_2a^3 \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 + 2\gamma_2} E \text{ grad } |\vec{E}|, \quad (3.6)$$

где γ_1 и γ_2 — электрическая проводимость частицы и среды.

В постоянном электрическом поле время, за которое устанавливается свободный заряд на плохо проводящих частицах минералов кварца, кальцита, апатита, циркона ($\epsilon_1 = 5-8$, $\gamma_1 = 10^{-14}$ — 10^{-12} Ом $^{-1}$ м $^{-1}$), может составлять более секунды [20]. А на частицах минералов лимонита, сфалерита, гематита с более высокой проводимостью ($\epsilon_1 = 10-20$, $\gamma_1 = 10^{-3}$ — 10^{-10} Ом $^{-1}$ м $^{-1}$) время установления заряда составляет менее сотых долей секунды.

В переменном электрическом поле максимальная величина свободного заряда зависит как от диэлектрической проницаемости и электрических проводимостей частицы и окружающей среды, так и от периода изменения внешнего поля. Например, если период изменения поля T значительно меньше времени установления свободного заряда t , т. е. $T \ll t$, то свободный заряд не успевает накапливаться и сила, действующая на частицу в неоднородном поле, не будет зависеть от сопротивления частицы (см. формулу 3.5). И наоборот, если $T \gg t$, то эта сила будет зависеть от различия электрических проводимостей частицы и окружающей ее среды (см. формулу 3.6).

Сила, обусловленная неоднородностью электрического поля, практически оказывается достаточной для перемещения частиц только в непосредственной близости у электродов, создающих резконеоднородное поле. Эти силы быстро убывают с увеличением расстояния от электродов.

В области межэлектродного промежутка, непосредственно примыкающей к проводам и выступам, наибольшие значения E в воздухе не могут превышать 1 кВ/см 2 .

Различия величин и направлений сил, действующих в неоднородном электрическом поле, используют при диэлектрической сепарации.

Диэлектрическая сепарация может осуществляться в сильных постоянных и переменных внешних электрических полях. В переменном электрическом поле влияние избыточного заряда частицы сказывается меньше, чем в постоянном поле, в связи с периодическим изменением знака напряженности E . Действительно, суммарная электрическая сила состоит из составляющей, действующей на избыточный заряд частицы q , и составляющей,

возникающей из-за неравномерного распределения напряженности,

$$\vec{F} = q\vec{E} + k \text{grad} |\vec{E}|,$$

где k — коэффициент, зависящий от электрических свойств формы частиц.

Проведены [20] исследования по диэлектрической сепарации в жидкой среде в связи с тем, что в жидких диэлектриках возможно использование электрических полей более высоких напряженностей, чем в воздухе.

Существующие конструкции диэлектрических сепараторов жидкой средой позволяют осуществлять разделение частиц крупностью до 200 мкм при производительности до 10 кг/ч. Поэтому эти сепараторы нашли применение только при исследовании минерального состава руды.

Диэлектрическую проницаемость ϵ_2 и электрическую проводимость γ_2 среды на практике обычно подбирают путем небольших добавок к неполярным жидким диэлектрикам (скипидар, керосин) полярных жидкостей (нитробензол, спирты).

Однако разделение свободных зарядов, вызванное наличием проводимостей у реальных частиц, позволяет в отдельных случаях осуществлять сепарацию в промышленных масштабах.

В сепараторах с коронирующими электродами в непосредственной близости от электродов образуется область с резко неравномерным полем. В этой области мелкие, а также удлиненные частицы могут двигаться к коронирующему электроду и осаждаться на нем. Осаждение частиц на электроде приводит к уменьшению тока короны и снижению стабильности работы сепаратора. Аналогичные явления могут наблюдаться, если в рабочей зоне электросепаратора на конструктивных элементах имеются выступы, неровности.

3.4. СИЛЫ ЗЕРКАЛЬНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ

Рассмотрим вначале частицу с точечным зарядом q , находящуюся вблизи проводящего электрода. Когда заряженная частица расположена у поверхности электрода или на нем, электрическое поле вблизи частицы отличается от поля одиночного заряда. Расчет такого поля удобно осуществлять методом зеркальных отображений. В случае плоского электрода электрическое поле совпадает с полем двух разноименно заряженных частиц, расположенных на одинаковом расстоянии от заземленной поверхности (рис. 3.5).

Силу, возникающую в связи с наличием электрода вблизи заряженной частицы, называют силой зеркального отражения F_3 . Эта сила направлена в сторону проводящего электрода

может быть определена по закону Кулона (см. рис. 3.5, а) как сила взаимодействия двух точечных зарядов

$$F_3 = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 d^2},$$

где d — расстояние между зарядом $+q$ и его зеркальным отображением $-q$.

В случае, если сферическая частица лежит на электроде (см. рис. 3.5, б) и ее заряд можно считать равномерно распределенным по поверхности частицы, то сила зеркального отображения

$$F_3 = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 a^2},$$

где a — радиус частицы.

Для удлиненных биполярно заряженных частиц необходимо учитывать силы зеркального отображения как для заряда q_1 , так и для заряда q_2 (см. рис. 3.5, в). Эти силы обусловлены взаимодействием зарядов соответственно q_1 и $-q_1$, q_1 и $-q_2$, q_2 и $-q_1$, q_2 и $-q_2$. Во внешнем однородном электрическом поле напряженностью E на заряды q_1 и q_2 действуют также силы, обусловленные этим полем. Если считать, что заряды сконцентрированы по концам тела, то сумма электрических сил в однородном поле для биполярно заряженной частицы может быть выражена как

$$F = (q_1 - q_2) E - \frac{q_1^2}{16\pi\epsilon_0 \left(\frac{d}{2} + l\right)^2} + \frac{q_1 q_2}{2\pi\epsilon_0 (d + l)} - \frac{q_2^2}{4\pi\epsilon_0 d^2}.$$

3.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЧАСТИЦЫ, НАХОДЯЩИЕСЯ НА ЭЛЕКТРОДЕ

При приближении заряженной частицы к электроду на ее поверхности происходит перераспределение зарядов. Когда частица оказывается на проводящем электроде, в результате изменения ее заряда (см. гл. 2) происходит и изменение во времени электрических сил, действующих на частицу.

Вывод формул, определяющих величину действующих сил на частицу, находящуюся на электроде, выполняется с учетом поло-

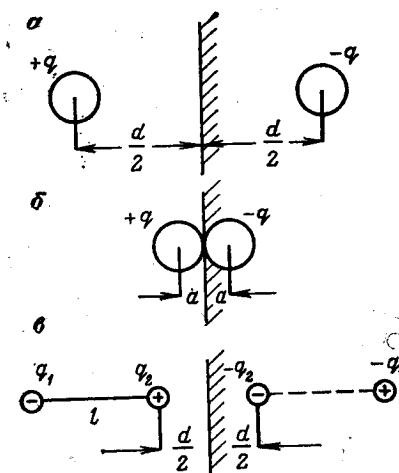


Рис. 3.5. Схема к расчету сил зеркального отображения

жений теории электродинамики. Однако конечные выражения просты для инженерных расчетов и помогают пояснить физическую сущность процесса.

Представим реальную частицу в виде близкого по форме полуэллипсоида (см. рис. 2.2), полуось a которого направлена вдоль напряженности внешнего электрического поля E_0 . В работе [21] показано, что на единицу площади поверхности полуэллипсоида действует электрическая сила

$$\vec{f} = \epsilon_0 (\epsilon_1 E_{1n} \vec{E}_1 - \epsilon_2 E_{2n} \vec{E}_2) - 0,5 \epsilon_0 (\epsilon_1 E_1^2 - \epsilon_2 E_2^2) \vec{n}_0, \quad (3.7)$$

где E_1, E_2 — напряженность электрического поля внутри частицы и на ее поверхности; E_{1n}, E_{2n} — нормальные составляющие этих напряженностей; \vec{n}_0 — единичный вектор нормали к поверхности полуэллипсоида.

Интегрирование выражения (3.7) можно осуществить после определения значений E_1 и E_2 по заряду частицы и напряженности внешнего электрического поля. Такие преобразования удается выполнить с учетом особенностей распределения свободного заряда по поверхности эллипсоида [8] и граничных условий для реальных диэлектриков. Примем, что внешнее электрическое поле с напряженностью E_0 — постоянно и равномерно.

Чтобы получить выражение для полной силы F , следует выражение (3.7) проинтегрировать по поверхности полуэллипсоида. Учитывая, что из соображений симметрии сила f направлена вдоль внешнего поля, достаточно взять только проекцию вектора \vec{f} на ось z

$$f_z = \epsilon_0 (\epsilon_1 E_{1z} E_{1z} - E_{2z} E_{2z}) - 0,5 \epsilon_0 (\epsilon_1 E_1^2 - E_2^2) \cos \theta. \quad (3.8)$$

Подставим в формулу (3.8) соотношения между напряженностями, которые можно получить из векторных диаграмм

$$E_{1n} = E_1 \cos \theta, \quad E_{1z} = E_1, \quad E_{2z} = E_{2t} \sin \theta + E_{2n} \cos \theta;$$

$$E_2^2 = E_{1t}^2 + E_{2n}^2$$

и из граничных условий

$$E_{2n} = E_{1n} + \frac{\sigma}{\epsilon_0}; \quad E_{1t} = E_{2t} = E_1 \sin \theta$$

получим

$$f_z = 0,5 \epsilon_0 \left\{ E_1^2 \cos \theta (\epsilon - 1) - 2 E_1 \frac{\sigma}{\epsilon_0} - \frac{\sigma^2}{\epsilon^2} \cos \theta \right\}; \quad (3.9)$$

$$\sigma = \frac{q}{\pi bc};$$

$$\int_{S_{эл/2}} \cos \theta dS = \pi bc.$$

После интегрирования выражения (3.9) по поверхности полуэллипсоида получим значение электрической силы F , действующей на частицу полуэллипсоидальной формы, находящиеся в контакте с проводящим электродом

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (3.10)$$

$$F_1 = k (\epsilon_1 - 1);$$

$$F_2 = 2k\alpha (\epsilon_1 d_a - d_a + 1);$$

$$F_3 = k\alpha^2 (\epsilon_1 d_a^2 - d_a^2 + 2d_a - I), \quad (3.11)$$

при

где для случая $b=c$, имеем

$$k = 0,5 \pi b^2 E_0^2 \epsilon_0; \quad k\alpha = 0,5 E_0 q(t),$$

$$I = \frac{p^2}{p^2 - 1} \left[1 - \frac{2 \ln p}{p^2 - 1} \right],$$

где

$$p = \frac{b}{a}.$$

Величина заряда в каждый момент времени определяется из выражения (2.7).

Составляющая сила F_1 всегда стремится оторвать частицу от электрода. Направление действия силы F_2 зависит от направления напряженности E_0 и знака $q(t)$. Сила F_3 всегда прижимает частицу к электроду, так как эта составляющая определяется зарядом частицы и не зависит от E_0 .

Выражение (3.10) для проводящей полусферы ($\gamma_{v1} \gg \gamma_{v2}$, $c/a = b/a = 0,5$, $d_a = 0,172$, $I = 0,282$) значительно упрощается

$$F = -4,76 \pi b^2 \epsilon_0 E_0. \quad (3.12)$$

Большинство барабанных электросепараторов, используемых в промышленности, предназначено для работы в режиме коронного разряда, который позволяет использовать для разделения отличия в электрической проводимости минералов.

Устойчивость процесса электросепарации на коронных электросепараторах определяется тем, что у разных минералов электрическая проводимость может отличаться на несколько порядков, и в поле коронного разряда эти минералы получают заряды, значительно отличающиеся по величине. После зарядки в поле короны частицы попадают в электростатическое поле, где разделяются на ряд потоков. В процессе зарядки и разделения меняются во времени электрические заряды частиц, а следовательно, и электрические силы, действующие на частицы. Выражения (2.7) и (3.10) описывают сепарацию по проводимости в коронных электросепараторах.

Кинетика процесса для частиц размерами $a = 0,125$ мм, $b = c = 0,25$ мм показана на рис. 3.6 (при $E_0 = 4$ кВ/см; $j =$

-10^{-4} А/м; $\epsilon_1=6$). Принято, что частицы перед вхождением в зону действия электродов не имели начального заряда ($q_0=0$), хотя частицы обычно предварительно заряжены, например в результате трибозарядки. Практически время нахождения частиц в поле коронного разряда регулируется установкой по ходу движения материала соответствующего числа коронирующих электродов и частотой вращения осадительного электрода. Однако частицы с малой проводимостью, имеющие большие постоянные времена зарядки и разрядки, не всегда удается зарядить до предельных значений (см. рис. 3.6).

После завершения зарядки в поле коронного разряда электрические силы для частиц с большой проводимостью ($\gamma=10^{-8}$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$ и более) стремятся оторвать эти частицы от осадительного электрода, а частицы с малой проводимостью ($\gamma=10^{-12}$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$ и менее) прижимаются электрическими силами к этому электроду. Параметры тока коронного разряда влияют как на величину, так и знак силы (3.10). С уменьшением тока коронного разряда сила действующая на частицы может изменить свой знак и оказаться направленной в сторону от осадительного электрода [22].

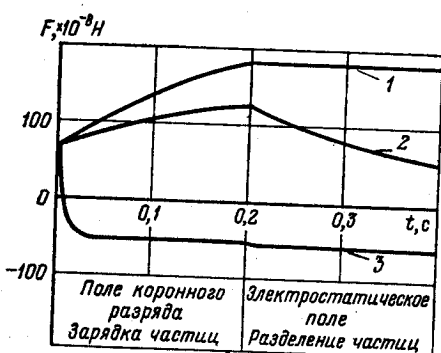


Рис. 3.6. Электрические силы в процессе электросепарации

Свойства частиц соответствуют данным табл. 3.1: 1 — вариант 4 ($\gamma=10^{-10}$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$); 2 — вариант 5 ($\gamma=10^{-10}$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$); 3 — вариант 6 ($\gamma=10^{-8}$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$)

Разделению частиц способствует установка электродов, которые отклоняют частицы от осадительного электрода.

За время нахождения частиц в зоне электростатических электродов, составляющие, например для барабанных сепараторов обычно 0,02—0,3 с, силы для частиц с большой и малой проводимостью практически не изменяются по сравнению с силами в поле коронного разряда. Поэтому определяющим режимом для успешной электросепарации является режим зарядки. Частицы со средней проводимостью ($\gamma=10^{-10}$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$) за время нахождения в зоне разделения могут значительно изменить свой заряд, вследствие чего сепарация таких частиц затруднена.

В табл. 3.1 приведены расчетные значения сил (F_∞) после окончания процесса зарядки ($t=\infty$) в поле коронного разряда

Таблица 3.1
Силы при зарядке различных по форме частиц, находящихся в контакте с электродом

Вариант	a, мм	γ , Ом $^{-1}$ м $^{-1}$	Коронный разряд			Электростатическое поле $F_\infty, \times 10^{-8}$ Н
			$F_\infty, \times 10^{-8}$ Н	$F_3, \times 10^{-8}$ Н	$\frac{F_\infty}{F_k}$	
1	0,025	10^{-12}	4140	4045	21,8	-18,1
2	0,025	10^{-10}	348	95,6	10,1	-18,1
3	0,025	10^{-8}	-17,9	78,9	0,57	-18,1
4	0,125	10^{-12}	265	44,7	5,48	-54,1
5	0,125	10^{-10}	150	9,64	6,67	-54,1
6	0,125	10^{-8}	-51,5	71,4	0,84	-54,1
7	0,5	10^{-12}	136	4,15	4,07	-133
8	0,5	10^{-10}	105	1,40	5,64	-133
9	0,5	10^{-8}	-118	74,4	0,84	-133
10	1,0	10^{-12}	94,6	0,284	5,24	-319
11	1,0	10^{-10}	93,8	0,267	5,37	-319
12	1,0	10^{-8}	-243	66,3	0,88	-319

Примечание. F_∞ — сумма сил при $t=\infty$ определяется по формуле (3.10); F_3 — сила зеркального отображения при $t=\infty$ определяется по формуле (3.12); $F_k=qE_0$ — сила, действующая на удаленную от электрода частицу.

и в электростатическом поле при $E=4$ кВ/см, $j=10^{-4}$ А/м, $\epsilon_1=6$, $b=c=0,25$ мм.

Как видно из табл. 3.1, для отрыва плоских частиц от электрода требуются более значительные усилия, чем для округлых и вытянутых частиц, ввиду больших значений сил зеркального отображения F_3 . Это связано с усилением поля для удлиненных частиц в месте, выдающимся из частицы, и перераспределением зарядов.

При отрыве заряженных частиц от осадительного электрода под действием электрических и механических сил электрическая сила резко изменяется от F_∞ (3.10) до $F_k=F_0q$. Отношение F_∞/F_k (см. табл. 3.1) может меняться в широких пределах; оно определяет начальное ускорение, с которым частицы движутся в случае отрыва от электрода. Величина этого ускорения зависит от формы и заряда частицы. Для проводящей вытянутой частицы первоначальное ускорение может быть небольшим, а для частиц округлой формы оно может быть значительным.

После зарядки в поле коронного разряда на частицы с малой проводимостью, лежащие на электроде, действуют значительно большие силы, чем на эти частицы, удаленные от электрода. Это обстоятельство способствует более эффективному разделению частиц по проводимости на барабанных коронных сепараторах, чем на камерных коронных.

В электростатическом поле после окончания зарядки расчетные заряды, а следовательно, и силы действующие на

частицу, зависят от формы частиц и не зависят от их проводимости. При зарядке частицы приобретают заряд знака электрода и электрическая сила будет направлена в сторону электрода.

3.6. ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ НА ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ

При электросепарации помимо электрических сил, обусловленных зарядами частиц, имеют существенное значение механические силы: тяжести, центробежные, трения, сопротивления или движения среды, взаимодействия при столкновениях и др.

В общем случае траекторию движения заряженной частицы можно описать векторным уравнением

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \Sigma \vec{F}, \quad (3.13)$$

где m — масса частицы; $\frac{d\vec{v}}{dt}$ — ее ускорение; ΣF — результирующая всех действующих на частицу сил.

Одной из основных составляющих результирующей силы является сила сопротивления среды F_c . Эта сила определяет установившуюся скорость движения и зависит от скорости частицы, ее размеров и формы. Теоретически сопротивление среды вычисляется для эллипсоидов [19], в частности шара, для остальных частиц определяется экспериментальными методами.

Сопротивление среды для шара рассчитывается по формуле

$$F_c = c \frac{\rho v^2}{2} \pi a^2,$$

где c — коэффициент сопротивления; ρ — плотность среды (для воздуха $\rho = 1,293 \text{ кг/м}^3$); v — скорость движения частицы относительно среды; a — радиус шара.

Для эллипсоидальной частицы F_c определяется пересчетом.

Величина безразмерного коэффициента сопротивления c является однозначной функцией числа Рейнольдса Re

$$Re = \frac{2a\rho v}{\mu},$$

где v — скорость частицы; μ — динамическая вязкость среды (для воздуха $\mu = 1,86 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$).

Ввиду сложной зависимости силы сопротивления среды от скорости движения частицы уравнение (3.13) является нелинейным и не поддается аналитическому решению. Упростить решение уравнения (3.13) удается только в отдельных частных случаях при применении аналитической зависимости $c = f(Re)$ в определенном диапазоне чисел Рейнольдса.

Чаще всего в процессах электросепарации число Рейнольдса находится в диапазоне 1—100 [23]. Величину коэффициента сопротивления в указанном диапазоне можно приблизительно определить с помощью формулы

$$c \approx 30Re^{-3/4}.$$

Линейная аппроксимация силы сопротивления позволяет рассчитать движение заряженной частицы в однородном электрическом поле при $Re > 1$. В этом случае выражение для силы сопротивления имеет вид

$$F_c = k_c \beta \mu a (v - V^*),$$

где k_c и V^* — коэффициенты линейной аппроксимации.

На рис. 3.7 представлены расчетные зависимости [2] установившейся скорости движения сферических частиц в электрическом поле от их размера при различных значениях напряженности. Предполагалось, что заряд, приобретенный в поле коронного разряда, соответствует указанным напряженностям, т. е.

$$q = 12\pi\epsilon_0 a^2 E.$$

Установившиеся скорости частиц v в воздухе при электросепарации не превышают 1—5 м/с.

Для удлиненных (вытянутых) частиц ориентация влияет на величины силы сопротивления среды и электрической силы. Электрическая сила изменяется из-за того, что от ориентации частицы зависят поляризация частицы и заряд, приобретенный ею в электрическом поле.

Экспериментально установлено [2, 19], что большинство частиц в воздушной среде под действием гидродинамических сил приобретает определенную ориентацию. Частицы стремятся повернуться таким образом, чтобы испытываемое ими сопротивление среды было наибольшим. Такое положение соответствует ориентации плоских и удлиненных частиц длиной осью перпендикулярно к направлению движения.

Электрическое поле в свою очередь также оказывает ориентирующее действие на частицу. Вращающий момент, обусловленный полем, заставляет частицу повернуться таким образом,

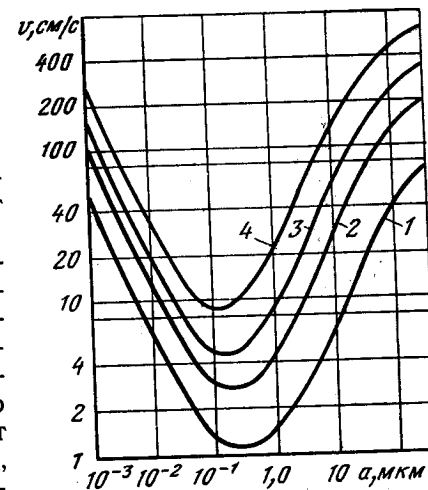


Рис. 3.7. Зависимость скорости движения сферических частиц в электрическом поле от радиуса частиц: 1 — $E=1 \text{ кВ/см}$; 2 — $E=2 \text{ кВ/см}$; 3 — $E=3 \text{ кВ/см}$; 4 — $E=5 \text{ кВ/см}$

чтобы ее наибольший линейный размер совпадал с направлением поля.

При электросепарации в воздушной среде ориентация частиц и время ее установления определяются совместным действием электрического и гидродинамических моментов. В зависимости от соотношения этих моментов частица может располагаться различным образом относительно направления действующих сил и направления движения.

В работе [24] приведены результаты исследований движения хлопковых волокон длиной 2,5 см, диаметром 20 мкм в поле коронного разряда при влажности среды 32 и 72%. При влажности 32% частицы являются диэлектриками и ориентируются перпендикулярно к направлению движения. При влажности 72% частицы ориентируются вдоль направления вектора напряженности электрического поля. Изменение ориентации объясняется увеличением электрического момента, обусловленного действием поля на биполярные заряды. Влажности 32 и 72% соответствовали при $E_1=2$ кВ/см биполярным зарядам $4 \cdot 10^{-11}$ и $2 \cdot 10^{-11}$ Кл, причем время ориентации при высокой влажности составляло менее 0,01 с.

В других экспериментах с частицами, у которых отношение длины к диаметру не столь велико, в процессе движения наблюдалось вращение частиц.

Помимо сопротивления среды на частицы влияет движение среды. Особым видом движения воздуха является электрический ветер, возникающий под действием тока коронного разряда. Электрический ветер возникает при соударении ионов с молекулами воздуха. Этот поток воздуха является турбулентным, его скорость зависит от тока короны и может превышать 1 м/с.

Экспериментальные данные [2] свидетельствуют о том, что скорость электрического ветра составляет заметную долю скорости движения частиц крупностью менее 30 мкм под действием поля. Даже при небольшом удалении от проводов скорость электрического ветра увеличивается, и только в непосредственной близости от плоских электродов влияние ветра на движение частиц пренебрежимо мало. Электрический ветер в системе электродов «игла — плоскость» представляет собой сравнительно узкую струю и его скорость существенно превосходит соответствующие значения скорости для системы электродов с проводами.

3.7. АДГЕЗИЯ

Микроскопические частицы могут прилипать к твердой поверхности, а также слипаться друг с другом. Возникающее при этом взаимодействие между частицами и поверхностью называют адгезией.

Адгезия частиц обусловлена различными по своей природе

силами и зависит от свойств соприкасающихся тел и окружающей среды. На силу адгезии влияют состояние и свойства поверхности (гидрофобность, гидрофильность, обработка реагентами, окисные пленки и др.), чистота обработки поверхности, размеры, форма и физико-химические свойства частиц, влажность воздуха, температура частиц и поверхности, материал поверхности, скорость качения частиц и др.

Основными составляющими адгезии являются молекулярные, капиллярные и электрические силы.

Молекулярные силы характеризуются взаимодействием между молекулами и проявляются на расстоянии, соизмеримом с диаметром молекул. Эта составляющая обусловлена свойствами соприкасающихся тел и зависит от размеров частицы, а также от площади истинного контакта.

Капиллярные силы возникают при наличии мениска жидкости в зазоре между частицей и поверхностью и проявляются при относительной влажности воздуха, превышающей 65%. Капиллярные силы можно уменьшить гидрофобизацией поверхности и тем самым снизить адгезию частиц.

Электрические силы при адгезии различают двух видов: определяемые контактной разностью потенциалов и силой зеркального отображения при наличии избыточного заряда. Силы, зависящие от контактной разности потенциалов, возникают в связи с образованием двойного электрического слоя при контакте частиц с поверхностью. Присутствие влаги в зазоре между соприкасающимися поверхностями исключает возможность проявления этих сил.

Отдельные составляющие сил адгезии при определенных условиях могут превалировать над другими. Так, при влажности воздуха более 70% увеличение адгезии микроскопических частиц обуславливается капиллярными силами. Если частица имеет большой заряд, электрические силы превышают другие составляющие сил адгезии.

Каждая из составляющих сил адгезии зависит от размеров частиц, но адгезия пропорциональна размерам частиц только в том случае, когда превалирующими силами являются молекулярные. Если при отрыве помимо этих сил преодолеваются капиллярные и электрические силы, то суммарная сила адгезии может быть и непропорциональна размерам частиц. Верхний предел крупности частиц, способных удерживаться на поверхности за счет молекулярных и капиллярных сил, не однозначен при разных условиях и может достигать более 100 мкм.

Форма частиц влияет на величину площади контакта, а следовательно, и на адгезию частиц. Адгезия плоских частиц больше, чем изометрических. К числу плоских относятся частицы каолина, бентонита, слюды, графита, гипса.

Очистку поверхностей от налипших частиц можно осуществлять постоянным и переменным электрическим полем.

В поле постоянного высокого напряжения не удается полностью очистить поверхности. В работе [25] показано, что под воздействием постоянного поля на налипшие частицы их число уменьшилось в 3—10 раз. Труднее удалялись мелкие частицы (20—30 мкм), легче и полнее частицы крупностью 100—120 мкм. Время воздействия электрического поля измерялось минутами.

Постоянное электрическое поле лучше очищает токопроводящие поверхности, чем диэлектрические. В переменном электрическом поле (100—600 Гц) наблюдается другая закономерность — сравнительно легко очищаются диэлектрические поверхности. В таком поле поверхность практически полностью очищается от налипших частиц, а время очистки составляет несколько секунд.

Характер движения частиц зависит от вида электрического поля. Под действием постоянного электрического поля частицы от поверхности летят к электроду, а в переменном электрическом поле частицы перемещаются по поверхности в сторону от высоковольтного электрода, и происходит сдвиг частиц подобно удалению их под действием воздушной струи.

Эффективность обогащения на электрических барабанных сепараторах при наличии значительного числа частиц крупностью менее 30—40 мкм значительно снижается. Вследствие адгезии такие частицы независимо от их физических свойств удерживаются на барабане и налипают на другие частицы, при этом нарушается нормальное для подобных сепараторов взаимодействие между механическими и электрическими силами.

Сепарация таких частиц затруднена также вследствие значительного разброса сил адгезии, так как величины различных составляющих сил адгезии могут изменяться в широком диапазоне. Существуют разброс величин электрических зарядов, неоднозначность площади контакта частиц с поверхностью, энергетическая неоднородность твердых поверхностей, влияющая на молекулярную составляющую. Так, при адгезии стеклянных сферических шариков к стальным поверхностям минимальные (F_{\min}) и максимальные (F_{\max}) силы адгезии были следующими [25]:

Диаметр частиц, мкм	30	60	80
Силы адгезии, Н:			
F_{\min}	$8,8 \cdot 10^{-9}$	$7,6 \cdot 10^{-9}$	$9 \cdot 10^{-10}$
F_{\max}	$7 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$

Значение F_{\min} в данном случае соответствует силе, при которой отрывается 5% частиц, а F_{\max} — силе, при которой отрывается 95% частиц.

Различие в адгезии порошков используется в трибоадгезионном методе обогащения, предложенном в 1952 г. Н. Ф. Олофинским [26]. В основе практического использования этого метода лежит изменение адгезии за счет электрической и, в отдельных случаях, молекулярной составляющей силы адгезии.

Предварительные трибозарядка и нагрев частиц уменьшают разброс величин зарядов у частиц с одинаковыми свойствами.

При трибоадгезионном методе используются также центробежные силы и силы адгезии, возникающие между частицами и поверхностью барабана. С его помощью можно обеспыливать, классифицировать и обогащать различные полезные ископаемые и материалы крупностью 0—5 мм.

Схема установки для трибоадгезионного обогащения минералов представлена на рис. 3.8. Частицы предварительно нагре-

вают трибозаряд на вибротке 1 [26], который подает материал на вращающийся барабан 2. Частицы, адгезия которых увеличивается за счет приобретенного заряда и становится больше центробежной, остаются на барабане, снимаются с него щеткой 3 и собираются в приемник 4. Остальные частицы попадают в приемники 5, 6.

С помощью трибоадгезионной сепарации представляется возможным обогащать флюэновые угли путем удаления флюэна, концентрирующиеся в пылевидной фракции, а также обогащать петрографически неоднородные угли, направляемые на коксование.

В отдельных случаях трибоадгезионные сепараторы позволяют эффективно осуществлять разделение тонкодисперсных материалов по вещественному составу, например железосодержащие продукты, низкосортные асбестосодержащие продукты и др.

Электрическая составляющая сил адгезии при трибоадгезионной сепарации определяется условиями трибозарядки частиц: подбором материала лотка, изменением метода транспортировки частиц (трубка, лоток), нагревом исходных материалов.

Изменить молекулярную составляющую силу адгезии возможно путем подбора материала барабана и степени его обработки. При исследовании [26] на сепараторе (см. рис. 3.8) установлено, что выход удерживаемой фракции кварца, магнетита, гематита, пирита, барита, асбеста на поверхности из белой жести и стали колеблется от 47 до 66%, а на латунной и алюминиевой поверхностях — от 26 до 50%. Адгезия этих материалов на белой жести и стали больше, чем на латуни и алюминии.

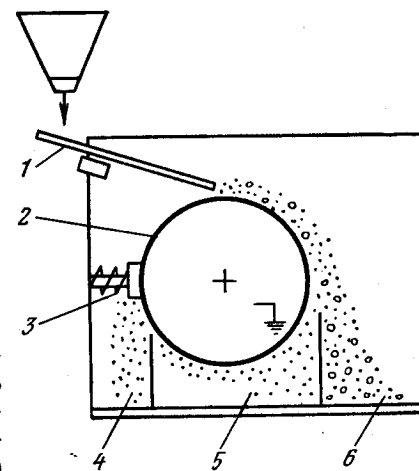


Рис. 3.8. Схема трибоадгезионного сепаратора

Работа сепараторов не сопровождается потерей тонкодисперсных частиц (имеющей место при рассеивании на ситах) и пылеобразованием. Результаты, полученные в лабораторных условиях, моделируются на промышленных сепараторах.

3.8. СИЛЫ В БАРАБАННЫХ СЕПАРАТОРАХ С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Барабанные электросепараторы в настоящее время позволяют наиболее полно использовать при сепарации электрические свойства частиц и полей, а также механические силы.

В барабанных сепараторах заряженные частицы помещаются на вращающийся заземленный барабан (осадительный электрод). Электростатическое поле в сепараторе обычно создается круглым отклоняющим электродом, который подключен к источнику высокого напряжения и установлен у поверхности осадительного электрода (см. рис. 1.2). Практика работы показывает, что диаметр и частота вращения осадительного электрода, а также распределение электрического поля значительно влияют на показатели сепарации.

Показатели разделения двух компонентов будут зависеть от начала их траекторий на барабане сепаратора. Точка отрыва может быть найдена решением уравнения равновесия сил, действующих на частицу при контакте с барабаном. Силы, действующие на частицы материала при сепарации, по мере вращения осадительного электрода непрерывно меняются и траектории движения частиц определяются соотношением удерживающих и отрывающих сил.

В основном на частицу действуют три силы: электрическая сила $F_{эл}$ и две механические — сила тяжести F_T и центробежная сила $F_{ц}$. Эти силы определяют, будет ли частица оставаться на барабане или упадет с него.

В данном случае, в целях упрощения, будем учитывать электрическую силу, действующую только на точечный заряд,

$$F_{эл} = qE,$$

и пренебрежем силой зеркального отображения и поляризацией. Это будет справедливо для округлых частиц диаметром около 0,5 мм.

На барабанных сепараторах с электростатическим полем может осуществляться разделение частиц с малой электрической проводимостью, у которых в процессе сепарации $q = \text{const}$. Заряды такие частицы приобретают в результате предварительной трибозарядки.

Сила тяжести, действующая на частицу,

$$\vec{F}_T = F_T = mg \cos \omega t$$

и центробежная сила

$$\vec{F}_{ц} = -m\omega^2 R_1,$$

где m — масса частицы, кг; g — ускорение свободного падения, м/с²; ω — частота вращения барабана, рад/с; t — время нахождения частицы на барабане, отсчитываемое с его верхней точки.

Сепаратор имеет высокую производительность при больших окружных скоростях барабана

$$v_{окр} = \omega R_1,$$

Однако существует оптимальная окружная скорость, соответствующая наибольшему расстоянию между точками отрыва разделяемых компонентов. В пределе при некоторой высокой частоте вращения все частицы отбрасываются от барабана как только коснутся его.

Сумма трех сил

$$\vec{F} = \vec{F}_T + \vec{F}_{ц} \pm \vec{F}_{эл}.$$

Частица оторвется от барабана в той точке M , где радиальная составляющая сил отрыва станет равной или превысит радиальную составляющую удерживающих сил, т. е. при $F = 0$. Поэтому будем учитывать только составляющие сил, нормальные к поверхности барабана; откуда угол ωt , определяющий положение указанной точки M , находится из условия $\vec{F} = 0$:

$$\vec{F} = \vec{F}_T + \vec{F}_{ц} \pm \vec{F}_{эл} = 0. \quad (3.14)$$

Можно считать, что электрические силы для сферической частицы в первом приближении пропорциональны a^2 (квадрату радиуса частицы), так как заряды распределяются по ее поверхности. Механические силы (вес, центробежная сила) пропорциональны объему тела или для сферической частицы пропорциональны a^3 . Частицы, которые слабо прилипают к барабану, тем быстрее спадают с него, чем больше их масса. Следовательно, по мере увеличения размера частиц увеличивается влияние механических сил по сравнению с электрической силой. Это обстоятельство ограничивает применение электросепарации для материалов определенного размера.

При описании равномерного поля частоту вращения ω и радиус барабана R_1 вводят только в одно слагаемое уравнения (3.14), поэтому расчет дает только экстремальное значение этого слагаемого, а не отдельно ω и R_1 .

Информацию об оптимальных условиях сепарации может дать зависимость углов отрыва частиц от произведения $\omega v_{окр} = \omega^2 R_1$. На рис. 3.9 эта зависимость приведена применительно к частицам микроклина, плагиоклаза и кварца диаметром 0,5 мм, нагретых до 150° С, у которых значения q/m после трибозарядки равны соответственно $2 \cdot 10^{-8}$, $0,8 \cdot 10^{-8}$ и $0,4 \cdot 10^{-8}$ Кл/г (знак заряда отрицательный). Принято, что напряженность

электрического поля равна 4 кВ/см. Рассматриваемый пример является сложным для электросепарации ввиду того, что все минералы имеют трибозаряд одного знака (отрицательный). Минимальная разность между углами отрыва этих частиц как при одинаковых ($F_{эл} = Eq_1 > 0$), так и разных ($F_{эл} = Eq_1 < 0$) полярностях частиц и отклоняющего электрода имеет место вблизи $\omega t = \frac{\pi}{2}$, а максимальная — у верхней точки осадительного электрода. Отрыв частиц одного из компонентов вблизи этой точки соответствует также наибольшей производительности.

Из рис. 3.9 следует, что целесообразно использовать при сепарации непроводящих минералов в равномерном поле осадительный электрод большого диаметра. При большом диаметре этого электрода увеличивается производительность сепаратора и повышается эффективность разделения материалов вследствие увеличения расстояния между точками отрыва сепарируемых материалов даже при одинаковой разнице в углах отрыва этих компонентов на барабанах разного диаметра.

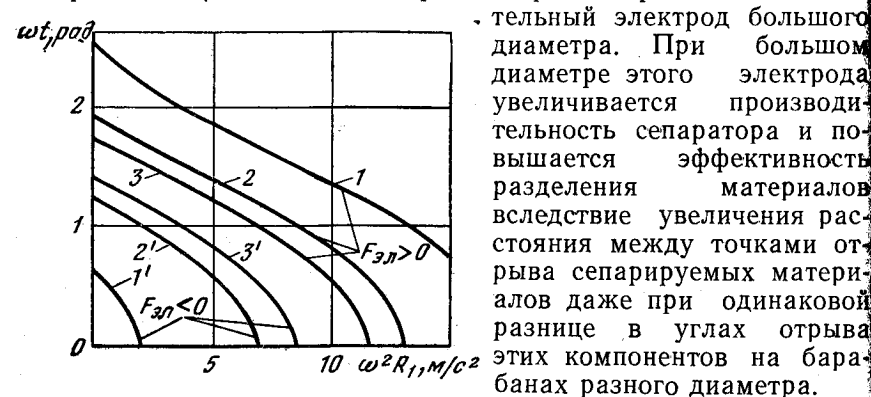


Рис. 3.9. Зависимость углов отрыва в равномерном поле от параметра $\omega^2 R_1$ при одноименной ($F_{эл} > 0$) и разноименной ($F_{эл} < 0$) полярности частиц и отклоняющего электрода:

1, 1' — $q/m = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл/г; 2, 2' — $q/m = 0,8 \cdot 10^{-8}$ Кл/г; 3, 3' — $q/m = 0,4 \cdot 10^{-8}$ Кл/г

СЭП-2, а также в промышленных электросепараторах фирмы «Карпко» (США). Сепараторы с барабанами больших диаметров не нашли применения в связи с тем, что в таких сепараторах часть материала, оторвавшегося от барабана, вновь падает на него. Для сепарации проводников применяются электросепараторы с барабанами меньших диаметров — 12—15 см.

Обычно распределение напряженности электрического поля по поверхности осадительного электрода неравномерно, так как это поле часто образовывается двумя цилиндрами ограниченного радиуса. Поэтому для частицы, находящейся на поверхности вращающегося барабана, электрическая сила изменится и зависит от угла θ . Углы ωt определяются из уравнения

$$\cos \omega t = \frac{\omega^2 R_1}{g} - \frac{E(\theta) q}{mg} \quad (3.15)$$

Распределение электрического поля подбирается расположением отклоняющего электрода относительно осадительного и формой отклоняющего электрода.

В неравномерном поле радиус осадительного электрода R_1 учитывается в величине как центробежной, так и электрической сил, вследствие чего на разницу между углами отрыва сепарируемых компонентов ($\omega t_1 - \omega t_2$) частота вращения и диаметр барабана влияют независимо от равномерного поля.

На рис. 3.10 приведены значения углов отрыва ωt_1 , ωt_2 и ωt_3 в зависимости от размещения отклоняющего электрода для двух значений диаметров барабана и тех же значений q/m , что и на рис. 3.9. Пунктиром показаны участки кривых, физически не осуществимые, так как частицы покидают барабан

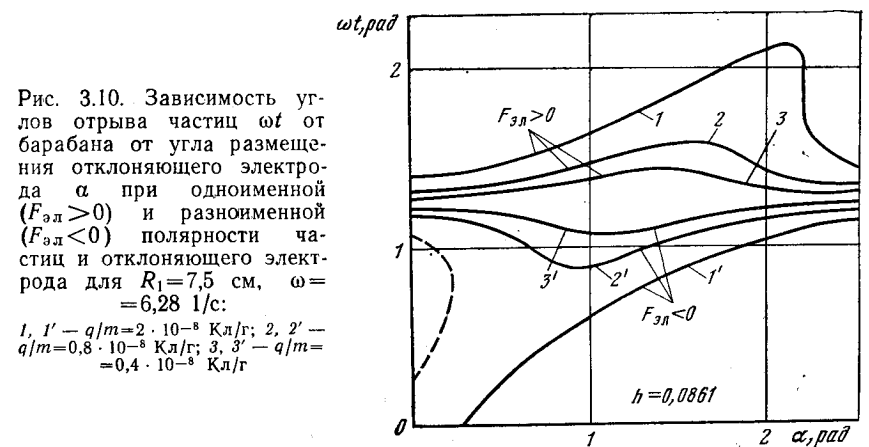


Рис. 3.10. Зависимость углов отрыва частиц ωt от барабана от угла размещения отклоняющего электрода α при одноименной ($F_{эл} > 0$) и разноименной ($F_{эл} < 0$) полярности частиц и отклоняющего электрода для $R_1 = 7,5$ см, $\omega = 6,28$ 1/с:

1, 1' — $q/m = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл/г; 2, 2' — $q/m = 0,8 \cdot 10^{-8}$ Кл/г; 3, 3' — $q/m = 0,4 \cdot 10^{-8}$ Кл/г

при наименьшем угле ωt , определяемом возможными решениями уравнения (3.15). Разница между углами ωt для частиц, имеющих отличающиеся друг от друга величины q/m , позволяет судить об эффективности сепарации при заданном положении отклоняющего электрода: $\alpha = \omega t - \theta + \pi$, а также определить графически оптимальное положение этого электрода.

Подбором частоты вращения и диаметра барабана, формы электрического поля (диаметра и расположения отклоняющего электрода) можно добиться, чтобы разница между углами отрыва в неоднородном электрическом поле превышала эту наибольшую разницу в однородном поле. Действительно, в неравномерном поле электрическая сила, действующая на частицы, имеет на определенном участке барабана наибольшее значение. Если частицы, например, имеют полярность разноименную знаку отклоняющего электрода, то в зоне действия отклоняющего электрода частицы, имеющие большой заряд, отрываются от барабана, а частицы с меньшим зарядом остаются на барабане и выносятся из этой зоны. После выхода частиц с неболь-

шим зарядом из зоны действия отклоняющего электрода их стремится оторвать от барабана только центробежная сила. Таким образом, в неравномерном поле можно создать условия, при которых частицы с большим зарядом отрываются под действием электрических и центробежных сил, а частицы с меньшим зарядом отрываются практически только под действием центробежных сил. В равномерном поле на все частицы постоянно действует электрическая сила поля отклоняющего электрода; эта сила складывается с центробежной силой и отрывает от барабана частицы с меньшим зарядом раньше, чем в неравномерном поле. Следует учитывать, что в неравномерном поле зона, благоприятная для сепарации, имеет место при определенном положении отклоняющего электрода.

В результате выбора формы электрического поля и частоты вращения барабана можно подобрать параметры работы сепараторов с отличающимися радиусами барабана так, чтобы разница между углами отрыва частиц компонентов сепарируемого материала была бы практически одинаковой. Однако, как и в случае однородного поля, большое расстояние между углами отрыва ω_1 , ω_2 и т. д. улучшает селективность электросепарации и облегчает ее регулировку.

В зависимости от свойств частиц и параметров технологического процесса увеличение частоты вращения барабана может привести как к увеличению разницы между углами отрыва частиц, так и к ее уменьшению. При этом оптимальное место размещения отклоняющего электрода приближается к верхней точке осадительного электрода. Высокая частота вращения барабана может оказаться целесообразной при использовании разноименных полярностей отклоняющего электрода и частиц. Зона расположения отклоняющего электрода, благоприятная для сепарации, при противоположных полярностях отклоняющего электрода и частиц ($F_{эл} = Eq < 0$) находится ближе к верхней точке барабана, чем в случае одинаковой полярности отклоняющего электрода и частиц ($F_{эл} = Eq > 0$).

Таким образом, для получения оптимальных показателей сепарации необходимо выбрать соответствующую конструкцию и параметры технологического процесса.

ГЛАВА 4

ПОДГОТОВКА МАТЕРИАЛОВ К СЕПАРАЦИИ

4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПО КРУПНОСТИ

Каждый минерал характеризуется какими-то особыми признаками, по которым его всегда можно отличить от других, например плотность, твердость, блеск и др. На различии физических и физико-химических свойств минералов основаны все известные методы обогащения. Особенностью электрических свойств веществ является то, что они зависят от влажности и температуры окружающей среды. Электрические свойства проявляются по-разному в зависимости от формы и размеров частиц. Все это определяет важность соответствующих подготовительных операций перед электросепарацией.

Существует мнение, что электрическая сепарация требует более тщательной предварительной обработки обогащаемого материала и более точного соблюдения всех технологических условий, чем флотация. Однако такое мнение сложилось в значительной степени из-за недостаточной изученности электросепарации (не всегда ясно, какие факторы влияют на процесс).

Подготовительные операции перед электрической сепарацией обусловлены как свойствами исходной руды, так и условиями процесса. К таким операциям относятся классификация предварительно измельченного или исходного (в случае обогащения песков россыпных месторождений) материала по классам крупности, обеспыливание, оттирка, сушка руды.

Технологические результаты обогащения в электросепараторах большинства типов зависят от отношения величины заряда к массе частицы (q/m). Для камерных сепараторов это показано в п. 3.1, а для барабанных в п. 3.8. Величины зарядов частиц при прочих равных условиях определяются площадью поверхности частиц. В явном виде это следует из формул (2.1) и (2.12) для величин зарядов частиц в поле короны и при индукционной зарядке. В указанных простейших случаях величина заряда пропорциональна квадрату радиуса шарообразной частицы (масса шарообразной частицы пропорциональна кубу радиуса). Поэтому, с одной стороны, электросепараторы могут быть использованы для классификации частиц по крупности, с другой — значительный разброс размеров частиц затрудняет сепарацию.

В то же время, как показывает практика, высокие результаты электросепарации удается достигнуть без тщательной классификации материала по крупности. Указанное обстоятельство вызвано тем, что при трибозарядке разделяемые частицы

часто получают разноименные заряды, а при зарядке в поле короны и сепарации на барабанных сепараторах проводящие частицы любых размеров теряют свой заряд, а непроводящие остаются заряженными и силами зеркального отображения задерживаются на барабане.

Верхняя граница крупности исходного материала определяется величинами электрических сил, способными перемещать частицы определенной массы, и размерами зерен ценного минерала и пустой породы в руде. Электросепарации могут быть подвержены минералы с крупностью зерен менее 3—3,5 мм, освобожденные от тонкого шлама и желательные разделенные на несколько фракций, например 2—3; 1—2; 0,25—1 мм. Для некоторых минералов, например слюд, верхний предел крупности зерен может достигать до 5—6 мм. Наличие посторонних крупных примесей вызывает забивку питающих и отводящих продукты обогащения отверстий сепаратора, нарушает равномерность подачи питания.

Нижняя граница крупности зерен ограничена силами адгезии, приводящими к образованию агломератов частиц, налипанию их на части конструкции сепаратора, и составляет обычно 30—70 мкм для большинства типов сепараторов. Производительность процесса снижается при уменьшении крупности материала, что вызвано необходимостью однослойного питания электросепараторов.

4.2. НАГРЕВ. ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА ПРОЦЕСС СЕПАРАЦИИ

Температура и влажность являются важными факторами, регулирующими процесс электросепарации. В связи с тем, что эти два параметра связаны друг с другом, регулирование температуры технически осуществляется проще, оптимальные условия сепарации часто подбирают путем нагрева материала и при необходимости его последующего охлаждения. Существенно влияют на электросепарацию также температура окружающей среды, осадительного электрода, подложки.

Нагрев частиц приводит к изменению ряда их физических и физико-химических параметров. При повышении температуры увеличиваются энергия электронов в объеме частицы и подвижность свободных ионов. Это приводит, в частности, к уменьшению электрической проводимости металлов и увеличению электрической проводимости полупроводников и диэлектриков. От температуры существенно зависят и величины трибозарядов частиц.

Ряд минералов характеризуются необратимыми изменениями после достаточно продолжительного нагревания их в интервале температур 100—800°С [26]. Это положение подтвердилось при измерениях электрической проводимости касситерита,

барита, кварца и полевого шпата в зависимости от температуры их нагрева (рис. 4.1). Электрические проводимости, измеренные при нагреве и охлаждении, не совпадают, что связано с физико-химическими превращениями, происходящими в этих минералах.

Нагрев частиц изменяет величину сил адгезии. Это, в частности, приводит к тому, что при повышении температуры увеличивается предел крупности частиц, налипающих на осадительный электрод. Например, в работе [26] при изучении трибоад-

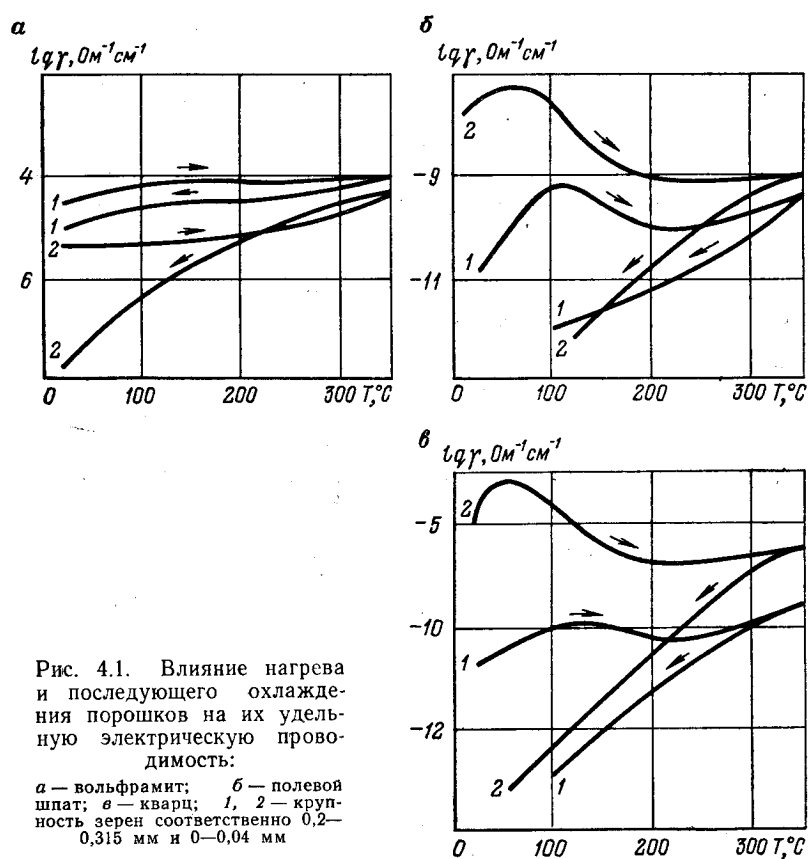


Рис. 4.1. Влияние нагрева и последующего охлаждения порошков на их удельную электрическую проводимость:

а — вольфрамит; б — полевой шпат; в — кварц; 1, 2 — крупность зерен соответственно 0,2—0,315 мм и 0—0,04 мм

гезионной сепарации установлено, что для материалов крупностью 0—5 мм при их нагреве до 300°С выход удерживаемых на осадительном электроде частиц увеличивался в 1,5—2 раза, а для частиц крупностью 0—1 мм повышался в 3 раза уже при температуре 150—200°С.

В минералах различают поверхностную, капиллярную и химически связанную влагу. Ввиду того что на процесс электро-

сепарации в большой мере влияет поверхностная влага, часто бывает достаточным удалить только поверхностную пленку адсорбированной влаги. Химически связанная влага входит в состав самих минералов и при удалении этой влаги минералы изменяют свое химическое состояние.

Существует несколько стадий поглощения минералами воды. Для солевых руд, в частности компонентов калийно-магниевого руды [27], на первой стадии соединяются диполи воды со свободными валентностями, а на следующей стадии заполняются микротрещины и капилляры.

Влажность, так же как и температура материала, имеет существенное значение вне зависимости от того, основано ли разделение на использовании различий в величинах трибозаря-

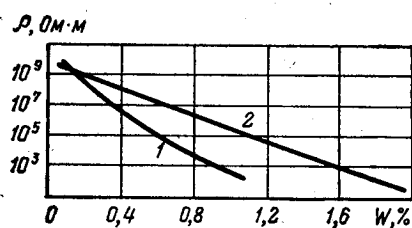


Рис. 4.2. Электрические сопротивления ρ компонентов калийно-магниевого руды в зависимости от содержания в них влаги W :

1 — солевой компонент; 2 — соленосная глина

дов или электрической проводимости минералов. С одной стороны, наличие влаги на поверхности всех компонентов сепарируемого материала уменьшает различия в поверхностных свойствах частиц. С другой — большое количество адсорбированной влаги увеличивает проводимость частиц, что вызывает быструю потерю ими электрических зарядов (рис. 4.2) [27]. Повышенная влажность материала приводит к слипанию частиц. Мелкие частицы налипают на крупные и изменяют их поверхностные свойства, в результате чего часть минералов попадает в приемники, предназначенные для других продуктов. Поэтому существенным для электросепарации является удаление при нагреве поверхностной пленки воды.

При сепарации сухого, но холодного материала влага адсорбируется на поверхности минералов, что часто нарушает разделение. Чтобы предотвратить адсорбцию влаги из воздуха, достаточно нагреть материал до 40—100° С. В то же время нагрев частиц повышает температуру окружающего воздуха, в котором происходит сепарация, и тем самым снижает его относительную влажность.

Оптимальные температура и влажность для каждого материала определяются экспериментальным путем. Имеют значение температура нагрева, время нагрева, температура, до которой охлаждается материал перед электросепарацией.

Для магнетита, гематита, металлических порошков, горелых земель при температурах, до которых они должны охлаждаться, наблюдается наибольшая разность в проводимостях и зарядах

нагретых и охлажденных материалов [26]. Рекомендуемый температурный режим для этих материалов: предварительный нагрев до 200—250° С с последующим охлаждением до 80—150° С.

Сепарация фосфоритных и калийных руд успешно осуществляется при нагреве до 400—450° С и последующем охлаждении первых руд до 120—140° и вторых до 70—120° С [28].

Температура нагрева минералов перед электросепарацией может отличаться для руд разных месторождений. Например, сепарация пегматитов Чупинского (Карелия) и Куру-Ваарского (Кольский полуостров) месторождений осуществляется при нагреве материала до 150° С, а пегматитов месторождения Отрадное (Кольский полуостров) при нагреве до 400° С.

В одних случаях некоторые минералы для хорошей сепарации требуют совершенно сухой поверхности и сухого воздуха, в других же — водяной пар, избирательно адсорбирующийся на поверхности одного из минералов, обеспечивает более четкую сепарацию. В связи с последним обстоятельством иногда после нагрева материала целесообразно обработать его влажным воздухом. Таким образом удается добиться оптимальной влажности, например, угля при его отделении от сланцев и глины или классификации углей по классам крупности [29]. Уголь более порист, чем сопутствующая пустая порода, и поэтому поглощенная влага увеличивает в значительной мере его проводимость.

В работе [30] отмечается, что чем крупнее и пористее минерал, тем больше допустимая его влажность. Например, при доводке алмазосодержащих концентратов, полученных из русловой россыпи, влажность для материала крупностью —2+1 мм не должна превышать 2% при его водопоглощении 5,3%, а для концентратов той же крупности, полученных из террасовой россыпи, предел влажности равен 3% при водопоглощении 7,6%.

В лабораторных условиях при разделении кварца и полевого шпата, если минералы и окружающий воздух совершенно сухие, оба минерала получают на алюминиевой подложке вибропитателя отрицательный заряд и не могут быть разделены. При небольшом увеличении влажности воздуха (допустимый верхний предел 20% относительной влажности) полевой шпат получает положительный заряд, а кварц остается отрицательно заряженным. В таких условиях минералы можно отделить друг от друга. При дальнейшем увеличении влажности воздуха кварц становится также положительно заряженным, а при очень большой влажности, ни кварц, ни полевой шпат не могут быть заряжены. Допустимая максимальная влажность для других минералов может быть выше. Например, флюорит и сфалерит успешно могут быть разделены в воздухе, имеющем большую влажность.

4.3. ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ. РЕАГЕНТНАЯ ОБРАБОТКА

Очистка поверхности частиц от прилипших к ней пыли, грязи и от пленок окислов осуществляется при механической оттирке, при мокрых гравитационных процессах, часто предшествующих электросепарации, при химической обработке реагентами.

Механическая оттирка, например, обычно предшествует электросепарации морских песков [31]. Причем такую подготовительную операцию необходимо проводить даже для песков, не имеющих видимую поверхностную пленку. Поверхностные пленки удаляют при мокром механическом дезинтегрировании.

Некоторые минералы не разделяются без их предварительной реагентной обработки поверхностно-активными веществами.

Реагентная обработка может применяться для селективного изменения сопротивления поверхности частиц, в частности, путем создания большей разницы в гидрофобности и гидрофильности поверхности разделяемых минералов, а также для селективного изменения электризации частиц при трибозарядке.

Результатами такой обработки могут быть: а) очистка поверхности минералов либо удаление загрязнений или окисной пленки с поверхности; б) избирательное обволакивание поверхности минералов некоторым слоем. В первом случае кондиционирование осуществляется преимущественно в водной суспензии, во втором — часто проводится в сухом состоянии, например при применении летучего реагента.

Для очистки поверхности минералов в водной суспензии используются следующие реагенты: серная, соляная, фтористоводородная кислоты, гидросульфит цинка. Часто встречающаяся пленка — окись железа — удаляется слабым раствором сернистой кислоты. Для избирательного обволакивания известно применение бензойной кислоты. Ее особенность заключается в том, что будучи летучим соединением при нагревании или при добавлении к минералам непосредственно после сушки она превращается в пар, который обволакивает частицы минералов тонкой пленкой. Кроме того, бензойную кислоту используют и в водных растворах. Аналогичные результаты могут быть получены при применении других соединений, таких как салициловая, фталиевая кислоты, крезол, ксилол. После обработки водными растворами минералы промываются чистой водой и при надобности сушатся.

Обработка соответствующими реагентами приводит к тому, что одни минералы изменяют знак трибозаряда, в то время как другие сохраняют полярность заряда.

Частицы сильвина и галита при трении об алюминиевую подложку заряжаются отрицательно [32], причем величина отрицательного заряда у частиц сильвина больше. Обработка

аммиаком приводит к тому, что сильвин при трибозарядке приобретает положительный заряд, а галит в этом случае знак заряда не меняет.

Возможно несколько механизмов действия реагентов. Например, сильвин и галит, обработанные ароматическими кислотами (салициловой и бензолсульфокислотой), незначительно изменяют свою электрическую проводимость даже в атмосфере высокой влажности [33]. Поэтому можно сделать вывод, что не происходит селективной сорбции этих реагентов на рассматриваемых минералах как это имеет место при действии аминов. Закрепление этих реагентов на сильвине и галите возможно путем химической адсорбции (хемосорбции), в результате чего образуется поверхностный слой нового химического соединения. Реакции обмена могут осуществляться не только с ионами натрия и калия с образованием соответствующих солей, но и с ионами других элементов, входящих в виде примесей в состав сильвина и галита. Возможна также адгезия (налипание) реагента на поверхности минералов с образованием поверхностной пленки органической кислоты.

Результатом действия этих реагентов на компоненты сильвинитовой руды являются гидрофобизация поверхности сильвина и галита, значительное увеличение их поверхностного сопротивления (на несколько порядков) и селективная трибозарядка при взаимном трении частичек.

В работе [34] рекомендуется для обработки гравитационных концентратов, содержащих пироксид, циркон, апатит, применять катионные реагенты ИМ-11 и алифатический амин (С₁₈), используемые также при флотации этих минералов. Концентрат обрабатывается раствором реагентов, после чего сушится, охлаждается и разделяется в электростатическом поле при относительной влажности воздуха 60—80%. Таким образом успешно отделяется пироксид.

Дальнейшее разделение концентрата возможно после обработки раствором фтористоводородной кислоты. После нее электрическая проводимость апатита повышается с $2,5 \cdot 10^{-14}$ до $3,5 \cdot 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, и он хорошо отделяется от циркона электросепарацией в поле коронного разряда.

При разделении смеси минералов, состоящей из пироксидов, циркона и апатита, в поле коронного разряда установлено [35], что обработка этих минералов реагентами сопровождается образованием на их поверхности пленок, обладающих различной способностью адсорбировать воду из окружающего воздуха, количество которой и определяет в основном величину поверхностной электрической проводимости. Концентраты, полученные после обогащения, содержали соответственно 95% циркона при извлечении 91,5% и 90% апатита при извлечении 95%.

Применительно к смесям сильвина и каменной соли обработка реагентами, успешно применяемыми при флотации, не поз-

Т а б л и ц а 4.1
Реагенты, применяемые при электрическом разделении минералов

Минералы	Реагенты
Алмаз—кварц Апатит	Поваренная соль (Р) Фтористоводородная кислота (5-10%-ный раствор) Олеиновая кислота То же Олеат натрия Катионный реагент ИМ-11 Олеиновая кислота Фтористый водород с NaOH (Р) Уксусная кислота (П), бензойная кислота (П) Уксусная кислота (П), бензойная кислота (П), нитробензол (Р), парафиновое масло, хинолин, хлорбензол Уксусная кислота (П), бензойная кислота (П) Крезол, олеат натрия Крезол, олеиновая кислота Серная кислота (П), фтористый водород (П) Крезол, олеат натрия, олеиновая кислота, медный купорос, хлористый натрий, ИМ-11, бензойная кислота Уксусная кислота (П), бензойная кислота (П) Олеат натрия, ИМ-11, смесь алифатических аминов C ₁₈ —C ₂₅ , серная кислота Янтарная кислота, фтористый водород (П), жирный амин янтарной кислоты C ₁₆ —C ₁₈ (50:1), жирный амин антрона C ₁₅ —C ₂₂ (75:1), бензосульфат натрия, салициловая кислота, бензойная кислота, ангидрид фталевой кислоты Фтористый водород (П) ИМ-11
Барит—вольфрамит Барит—касситерит Барит—кварц Барит—полевой шпат Барит—сульфиды Берилл—пегматит Бура	
Доломит—тальк	
Известняк	
Касситерит—силикаты Касситерит—шеелит Кварц—полевой шпат	
Кварц—сульфиды, вольфрамит, касситерит	
Магнетит	
Пироклор	
Флюорит—полевой шпат, барит	
Полевой шпат—кварц Полевой шпат—касситерит, вольфрамит, сульфиды Сподумен Сфалерит—пирит Барит—кварц, Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃	Фтористый водород (П) Сульфат меди (Р) Натриевая соль жирной кислоты C ₉ —C ₁₀ , бета-нафтол, натриевая соль диэтилбарбитуровой кислоты, сахарин Фтористоводородная кислота (5-10%-ный раствор) Бензойная кислота, салициловая кислота, фталевая кислота, щавелевая кислота Хлористый натрий, крезол
Циркон—апатит	
Циркон—кианит	
Шеелит—кварц	

Примечание. П—пар; Р—раствор.

волила эффективно разделить минералы в электрическом поле [36]. Показатели разделения калийных руд, обработанных жирными аминами, дипикриламином и его солями, тетрафенилборатом, кремневодородистой кислотой и его сульфатами оказались хуже, чем при термической обработке (нагрев до 500°С и сепарация при 130°С).

Выявилось, что для этих руд пригодны в качестве реагентов при электрической сепарации сульфокислоты, сульфонокислоты и их соли (например, сульфат оксистеариновой кислоты), а также органические, неорганические вещества, которые могут отщепить с образованием отрицательно заряженного молекулярного остатка один или несколько ионов водорода или металла. Также дают положительные результаты ангидриды кислот органического и неорганического происхождения одни или в смеси с названными средствами.

При реагентной обработке, в отличие от одной термической подготовки, наличие в калийных рудах в широких пределах водонерастворимых глинистых компонентов, а также пыли существенно не влияет на качество полученных продуктов.

Реагенты добавляют к измельченному материалу в виде раствора, суспензии, твердого или газообразного вещества в смесительных устройствах. Расходы реагентов составляют 5—200 г на тонну обогащаемого материала; температура сушки и разделения 25—50°С. Наиболее благоприятная температура зависит от вида руды и реагента, а также от влажности окружающего воздуха в процессе подготовки руды и в сепараторе.

Рекомендации для поверхностной обработки некоторых минералов приведены в табл. 4.1 [1, 31].

КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОСЕПАРАТОРОВ

5.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОСЕПАРАТОРОВ

В настоящее время создано большое количество электро-сепараторов различных конструкций. Для большинства из них характерна простота конструкции, возможность создания гибких схем обогащения и механизации процесса. Однако следует иметь в виду, что простота конструкции не отражает сложности физических процессов при электросепарации в сильных полях.

Классификацию электрических сепараторов осуществляют по различным признакам; а) конструкциям электродов и их взаиморасположению; б) электрическим свойствам частиц, используемых для сепарации; в) видам электрических полей.

Классификация по различным конструкциям электродов и их взаиморасположению наиболее полно отражает конструктивные отличия электросепараторов и определяет их внешний вид. Конструкция электродов обуславливает характер движения материала через рабочее пространство. Наиболее известны следующие типы сепараторов, отличающиеся конструкцией электродов, в основном заземленных: барабанные, лотковые, ленточные, виброплоскостные, камерные, кипящего слоя. В каждом из этих типов после небольших переделок или даже изменения режима, например подаваемого на электроды напряжения, могут использоваться разные свойства частиц или виды электрических сил.

Классификация по видам используемых для сепарации электрических свойств частиц следующая: электросепараторы для разделения частиц по электрической проводимости, трибоэлектрические, диэлектрические, трибоадгезионные. В сепараторах, рассчитанных на использование определенных свойств частиц, в какой-то степени проявляются и другие эффекты. Например, в сепараторах, основанных на использовании различной электропроводности минералов, осуществляется трибозарядка и диэлектрическая поляризация частиц.

Электросепараторы классифицируются также по видам электрических полей: электростатические, коронные и сепараторы, в которых используются оба этих вида полей. Вид используемого электрического поля также целесообразно указывать в названии сепаратора, например барабанный электростатический, барабанный коронно-электростатический.

В электростатических сепараторах током между электродами можно пренебречь и его наличие обычно является нежела-

тельным; в коронных сепараторах через воздушную среду проходит значительный ток. Когда же в сепараторах в разных рабочих зонах используются поля электростатические и коронного разряда, то они называются коронно-электростатические.

Выбор сепараторов с определенной конструкцией и расположением электродов, видом электрического поля, естественно, связан со свойствами частиц и требованиями, предъявляемыми к концентратам. Например, для разделения минералов, у которых электропроводность отличается на несколько порядков, успешно используются барабанные коронно-электростатические сепараторы. Сепарация материалов — непроводников, приобретающих различные трибозаряды, часто осуществляется на сепараторах с электростатическим полем — барабанных и лотковых.

Электрические сепараторы любой конструкции состоят из ряда основных узлов определенного назначения.

Питатели и питающие устройства служат для бесперебойной равномерной подачи в сепаратор исходного материала как по времени, так и по всей ширине рабочего органа. Обычно применяются питатели в воде вращающихся барабанов и неподвижных или вибрирующих лотков, изготовленных из проводящих материалов.

Электроды, между которыми создается сильное электрическое поле, подсоединяются к источнику высокого постоянного, пульсирующего или переменного напряжения, причем для упрощения конструкции и повышения безопасности работы один из электродов часто заземляется. Электроды, обычно заземленные, могут служить и для перемещения сепарируемых частиц внутри сепаратора и удаления их из рабочей зоны.

Высоковольтная часть сепараторов помимо источника высокого напряжения включает схему регулировки, измерения напряжения, тока и изолирующие элементы (высоковольтные кабели, изоляторы).

Привод и приводные устройства предназначены для обеспечения работы движущихся частей электрических сепараторов и включают электродвигатели, вибраторы и другие механизмы.

Устройства для сбора и разгрузки продуктов обогащения представляют собой тетки, лотки, конвейеры, шнеки, специальные разгрузочные устройства и т. д.

Рама и ограждающие кожухи служат для крепления частей сепаратора и ограждения обслуживающего персонала от случайных прикосновений к узлам, находящимся под высоким напряжением, а также для предотвращения проникновения пыли в окружающую сепаратор среду.

Аппаратура управления и контроля работы электросепараторов включает пускорегулирующие и контрольно-измерительные устройства и позволяет автоматизировать процесс управления и получать стабильные технологические результаты.

5.2. ВИДЫ БАРАБАНЫХ ЭЛЕКТРОСЕПАРАТОРОВ

На барабанных электрических сепараторах успешно осуществляется разделение минералов, значительно отличающихся по электропроводности, а также плохо проводящих минералов, которые получили различные заряды при трибозарядке. Кроме того, на барабанных электросепараторах классифицируются материалы по классам крупности и форме, а также разделяются частицы, имеющие различную диэлектрическую проницаемость.

Название этого вида сепараторов связано с тем, что осадительный электрод выполняется в виде вращающегося цилиндра (барабана), на который подается сепарируемый материал. На рис. 5.1 приведены схемы основных видов барабанных электрических сепараторов.

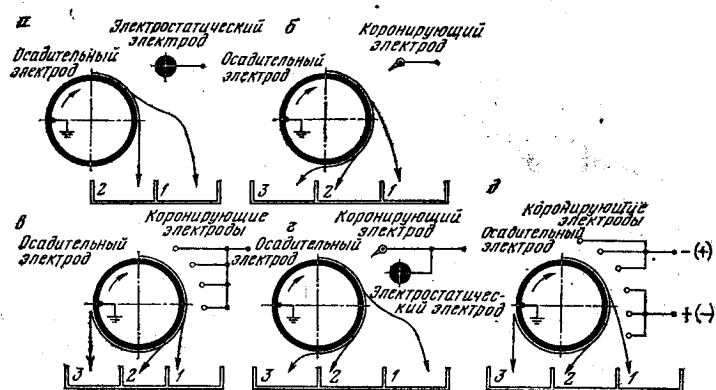


Рис. 5.1. Барабанные электросепараторы с различными системами высоковольтных электродов:

а — электростатический; б, в — коронный; г — коронно-электростатический; д — с чередующейся полярностью коронирующих электродов; 1—3 — приемники

ческих сепараторов. Обычно путем замены высоковольтных электродов можно легко переделать один вид барабанного сепаратора в другой.

В сепаратор материал подается на верхнюю точку осадительного электрода (барабана) с помощью одного из видов питателей. При вращении барабан переносит материал к месту размещения высоковольтных электродов — зарядных и отклоняющих, — изолированных от барабана и находящихся под высоким напряжением. Непосредственно разделение материала происходит в зонах между отклоняющим и осадительным электродом и под отклоняющим электродом. Продукты разделения направляются в соответствующие приемники с помощью передвижных отсекавателей. Для съема частиц, налипших на барабан, предусматриваются щетки.

В первых конструкциях, появившихся еще в самом начале века, на барабан подавали высокое напряжение, однако в дальнейшем стали его заземлять, что удобнее и безопаснее в работе. Одновременно заземляют и один из выводов высоковольтного источника электропитания. Если, например, высоковольтные электроды подсоединены к отрицательному полюсу источника, то по отношению к этим электродам заземленный барабан имеет положительный потенциал.

Барабанные электростатические сепараторы используются для сепарации после трибозарядки плохо проводящих материалов, имеющих близкие значения электропроводности, таких как кварц — микроклин, микроклин — плагиоклаз, галит — сильвенит, апатит — кварц, асбест — серпентин. Применяются эти сепараторы и для отделения частиц плоской или удлиненной формы и с высоким значением диэлектрической проницаемости, например слюды от кварц-полевошпатового сырья.

Ранее электростатические сепараторы использовались также для отделения проводников от непроводников, но затем они были вытеснены сепараторами с коронирующими электродами.

В зоне между отклоняющим электродом и барабаном частицы с зарядом, разноименным с отклоняющим электродом, отрываются от барабана и направляются в приемник 1 (см. рис. 5.1, а). Частицы, имеющие одноименный с отклоняющим электродом заряд, задерживаются на барабане и попадают в приемник 2. На барабанных сепараторах осуществляется также разделение частиц, имеющих одноименные, но отличающиеся по величине заряды. (Расчет электрических сил в барабанных сепараторах рассмотрен в гл. 3.) Например, слюда, несмотря на высокое сопротивление, отклоняется в тот же приемник 1, в который обычно попадают и проводящие фракции, что связано с формой слюды и ее высокой диэлектрической проницаемостью.

Разделение на барабанных электростатических сепараторах зависит от влажности, изменения температуры; необходимым условием является чистая поверхность минералов. Высококачественные концентраты обычно получают после трех и более перемещений. В то же время, как показала практика эксплуатации электростатических сепараторов, стабильные технологические показатели обычно имеют место при длительной непрерывной работе в промышленных условиях, если по условиям сепарации требуется предварительный нагрев материала.

Барабанные коронные сепараторы (рис. 5.1, б, в) предназначены для отделения хорошо проводящих частиц от частиц плохо проводящих. Отличие в величинах зарядов создается за счет различных скоростей разрядки частиц на осадительный электрод (см. гл. 2). Материал, высыпаясь из бункера, попадает на вращающийся барабан, который вносит

материал в зону коронного разряда под коронирующие электроды.

В поле коронного разряда на частицах оседают ионы, перемещающиеся от коронирующих электродов. Плохо проводящие частицы заряжаются этими ионами, приобретая заряд, одноименный знаку коронирующих электродов. Заряженные плохо проводящие частицы не разряжаются, удерживаются на вращающемся барабане силами зеркального отображения (налипают на барабан) и переносятся к щетке, которая их снимает в приемник 3. Часть крупных плохо проводящих частиц отрывается от барабана в нижней его части, но также может быть собрана в приемник 3. С хорошо проводящих частиц заряды от коронирующих электродов стекают на заземленный осадительный электрод и не накапливаются. Эти частицы отрываются от барабана под действием центробежных сил и сил тяжести и направляются в приемник 1.

Частицы с промежуточным значением электропроводности и сростки минералов различной электропроводности попадают в средний приемник 2. В него поступают также отдельные плохо проводящие и хорошо проводящие частицы, так как в процессе сепарации не все зерна оказываются в одинаковых условиях, в частности, контакту хорошо проводящей частицы с электродом может мешать плохо проводящая частица, а частицы неправильной формы оказываются по-разному ориентированы на электроде. Установка у поверхности барабана нескольких рядов коронирующих электродов (см. рис. 5.1, в) позволяет увеличить время зарядки частиц и тем самым разницу в величинах зарядов минералов с различной электропроводностью. Эта конструкция может быть целесообразной для сепарации крупнозернистых минералов. Коронирующие электроды в виде тонких проволочек натягиваются параллельно образующей барабана.

Барабанные коронно-электростатические сепараторы являются наиболее массовыми аппаратами. Электростатический электрод, устанавливаемый по ходу движения материала вслед за коронирующим, имеет обычно потенциал коронирующего электрода и способствует расширению потока сепарируемых частиц. Плохо проводящие частицы выходят из зоны действия коронирующих электродов, имея заряд того же знака, что и отклоняющий электрод, отталкиваются от отклоняющего электрода и прижимаются к барабану. Поле электростатического электрода способствует стеканию с частиц заряда, полученного от коронирующего электрода. За время пребывания в зоне электростатического электрода заряд частиц с низкой электропроводностью почти не меняется. Если же находящаяся на барабане заряженная частица является достаточно хорошим проводником, в электростатическом поле она заметно теряет свой заряд. Таким образом, статическое поле будет способствовать отрыву проводящей частицы от барабана.

В коронных и коронно-электростатических сепараторах зарядка и разделение частиц происходят непосредственно на осадительном электроде.

Опыт работы на этих сепараторах (см. рис. 5.1, б, в, г) показал, что при большом токе короны проводники и непроводники разделяются за одну сепарацию даже при большой частоте вращения. Процесс разделения в поле коронного разряда меньше зависит от полярности отклоняющего электрода, влажности и температуры материала, чем при сепарации в электростатическом поле.

В электросепараторе с коронирующими электродами и чередующейся полярности (см. рис. 5.1, д) у поверхности вращающегося осадительного электрода устанавливаются несколько коронирующих электродов, часть из которых подключают к положительному полюсу высоковольтного выпрямителя, а часть — к отрицательному [37]. Сепараторы могут быть использованы для разделения частиц по крупности и форме, в частности, для отделения минералов пластинчатой формы от минералов, имеющих изометрическую форму. Причем электрические характеристики минералов (сопротивление, диэлектрическая проницаемость) могут быть близкими, например у чешуек слюды и зерен кварца, полевого шпата.

Сепарируемые частицы подаются питателем на осадительный электрод, который перемещает их в первую зону действия коронирующих электродов какой-либо одной полярности. Здесь частицы приобретают заряд, одноименный с зарядом этих коронирующих электродов. В этой зоне после зарядки электрическая сила F_{∞} стремится прижать и плоские, и изометрические плохо проводящие частицы к осадительному электроду. Сила F_{∞} (см. табл. 3.1) для плоских частиц может более чем на порядок превышать эту силу для изометрических частиц [38].

Частицы перемещаются далее вращающимся барабаном во вторую зону действия коронирующих электродов, имеющих полярность, противоположную полярности коронирующих электродов первой зоны. В начальный период времени нахождения частиц во второй зоне электрическая сила для плоских частиц меняется незначительно ввиду больших зарядов и постоянных времени разрядки этих частиц на электроде (см. табл. 2.1). В электросепараторе с коронирующими электродами чередующейся полярности плоские плохо проводящие частицы задерживаются на осадительном электроде и попадают в приемник 3. У изометрических частиц во второй зоне суммарная электрическая сила вследствие быстрой перезарядки частиц значительно уменьшается по величине или даже может изменить свой знак, что приводит к отрыву этих частиц от вращающегося барабана.

Таким образом, в сепараторе с коронирующими электродами чередующейся полярности плоские частицы, например слю-

ды, попадают в приемник 3, расположенный под барабаном, а изометрические частицы в приемник 1, в то время как в сепараторе с электростатическим электродом слюда направляется в приемник 1, а изометрические частицы в приемники 2 и 3.

Аналогичные процессы происходят при подключении ряда коронирующих электродов к источнику напряжения переменной полярности [39].

5.3. КОНСТРУКЦИИ БАРАБАННЫХ ЭЛЕКТРОСЕПАРАТОРОВ

Для доводки редкометалльных концентратов применяются электрические секционные сепараторы типа СЭС-1000М и СЭС-2000 (рис. 5.2), разработанные Гипромашобогатением. Се-

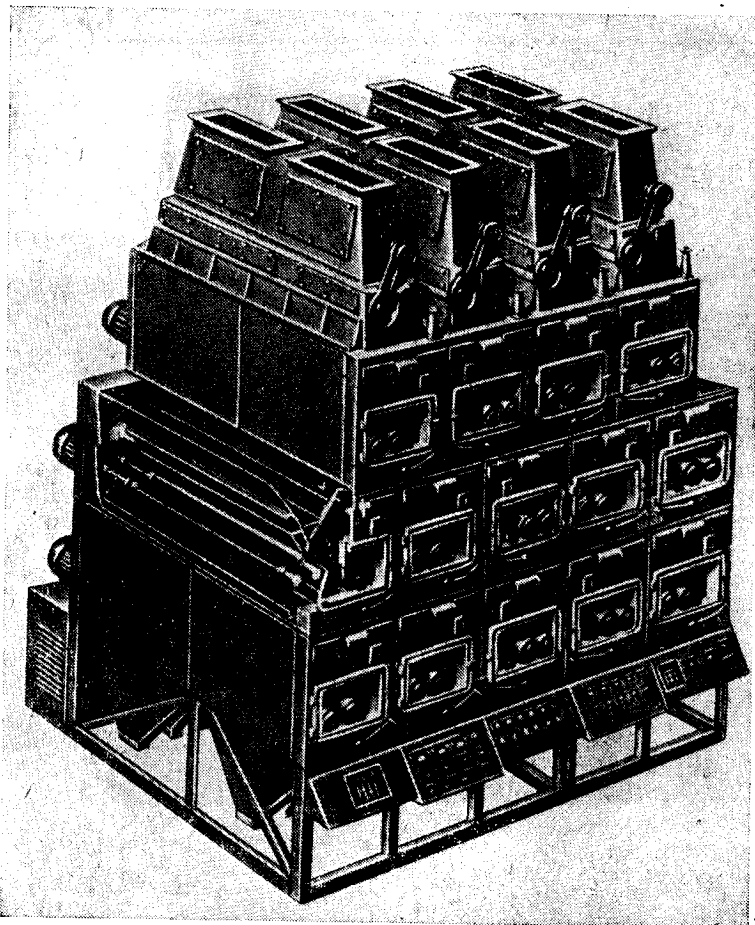


Рис. 5.2. Электрический сепаратор СЭС-2000, состоящий из 14 блоков

параторы серийно выпускаются Воронежским заводом горно-обогатительного оборудования. Технические характеристики электросепараторов приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Технические характеристики барабанных коронных электросепараторов

Параметры	СЭС-1000М	СЭС-2000	ЭС-1250	ЭС-3000
Производительность на один питатель, кг/ч	2000	4000	2000	5000
Число каскадов	По необходимости			
Число барабанов	То же			
Диаметр барабана, мм	125 и 150	150	130	160
Ширина питателя, мм	1000	2000	1250	3000
Частота вращения барабана, об/мин	110—800	430, 460, 490	300, 400, 450	350, 465, 565
Рабочее напряжение на электроде, кВ	0—20	0—20	0—20	0—20
Температура материала, °С	До 160	До 160	До 120	До 120
Максимальная крупность сепарируемого материала, мм	3	1,5	3	3
Установленная мощность, кВт:				
высоковольтного питания	0,75	0,75	0,03	0,25
привода питателя	0,4	0,4	0,6	0,6
привода барабана	1,1	1,1	2,8	1,7
нагревательных элементов	3,4	—	14	—
Габаритные размеры, мм:				
длина	2650	3650	2540	4370
ширина	1350; 2020; 2700; 3370	1350; 2020; 2700; 3370	930	930
высота	3950	3950	3390	1955
Масса, т	5—16,4	6,5—22	2,2	2,2

Сепараторы СЭС-1000М и СЭС-2000 в основном отличаются длиной барабана и, следовательно, производительностью на один питатель. В сепараторы входят валковые питатели и рабочие блоки (блоки электродов), установленные на общей сварной раме, в которую встроены пульт управления и выпрямительные установки. Рабочие блоки имеют одинаковые типоразмеры и изготавливаются в левом и правом исполнении. В зависимости от требуемой технологической схемы и производительности применяются различные компоновки и устанавливается соответствующее число блоков (рис. 5.3, а—г).

Валковый питатель барабанного типа предназначен для равномерной подачи сепарируемого материала в верхний рабочий блок. Подача материала регулируется изменением ширины рабочей щели питателя.

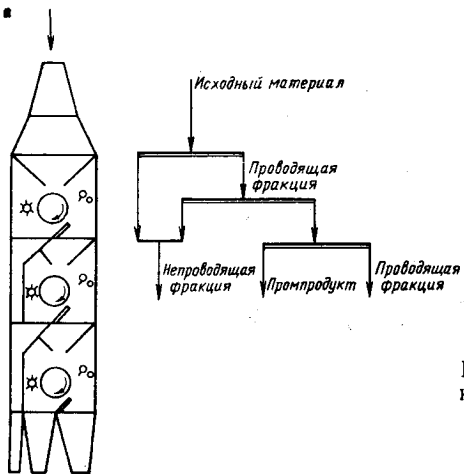
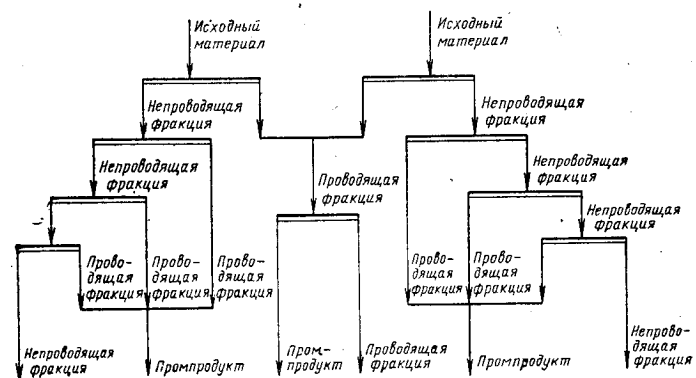
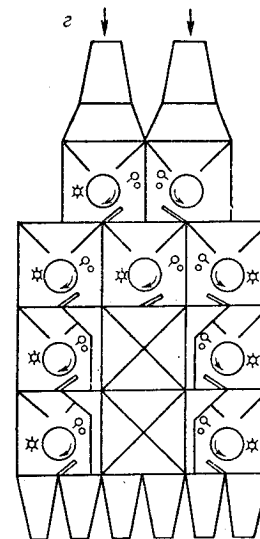
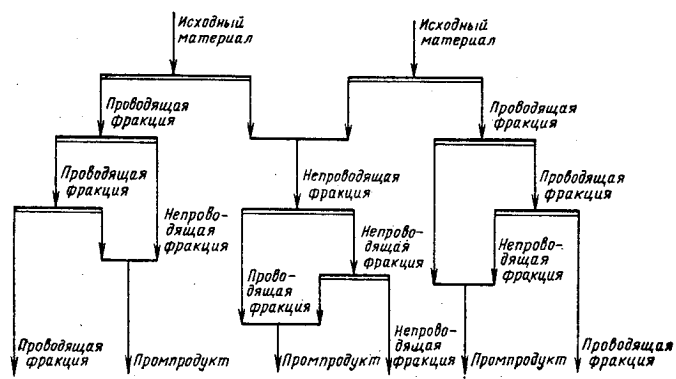
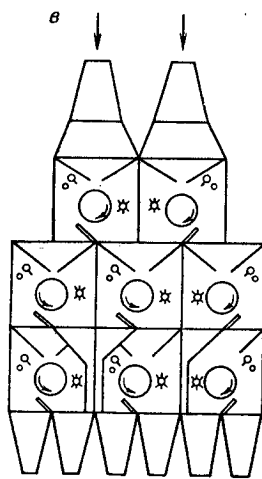
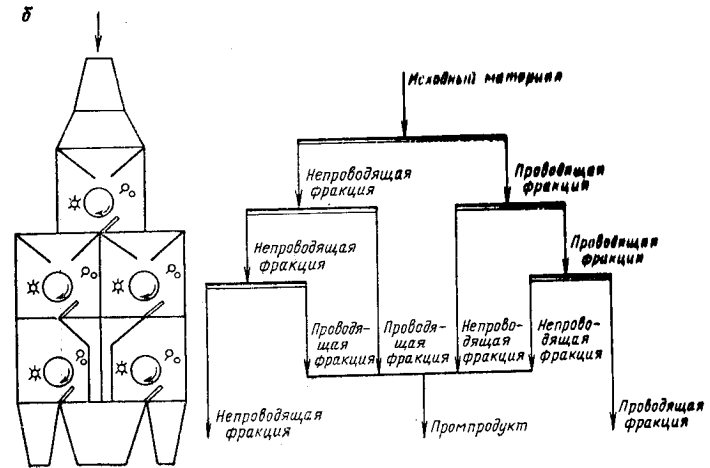


Рис. 5.3. Примеры вариантов компоновки электросепараторов СЭС-1000М и СЭС-2000



Осадительный электрод, имеющийся в каждом рабочем блоке, представляет собой вращающийся в подшипниках качения пустотелый барабан диаметром 150 мм. Каждый барабан имеет индивидуальный привод с регулируемой частотой вращения. Рабочая цилиндрическая поверхность осадительного электрода хромирована и отполирована.

Поверхности барабанов от налипших на них частиц очищаются вращающимися щетками. При износе щеток осадительный электрод покрывается мелкими частицами материала и сепарация нарушается, поэтому щетки имеют сменные резиновые лопасти. Вращение щеток осуществляется с помощью клиноременной передачи от того же электродвигателя, что и барабана.

У поверхности барабана на фарфоровых изоляторах устанавливаются коронирующий игольчатый электрод и отклоняющий электрод, представляющий собой эбонитовый цилиндр диаметром 30 мм, внутри которого имеется металлический стержень. Коронирующий и отклоняющий электроды закреплены на самостоятельных кронштейнах и положение их относительно осадительного регулируется отдельно. В одном блоке высоковольтные электроды имеют одинаковый потенциал и подключены к одному выпрямителю.

Потоки материала с помощью подвижных отсекателей со штыревыми фиксаторами направляются в две точки. Положение отсекателей может регулироваться в процессе наладки. В зависимости от компоновки сепаратора и расположения блока материала выводится наружу или поступает в следующий блок для пересортировки.

Высокое постоянное напряжение на электроды подается высоковольтным кабелем от выпрямительной установки ВС-20-10 (20 кВ; 10 мА). Полярность напряжения изменяется переключением высоковольтного кабеля на выводах выпрямителя, величина напряжения регулируется автотрансформатором, включенным в низковольтную цепь повышающего трансформатора и размещенным на пульте управления.

Защита обслуживающего персонала от поражения током высокого напряжения осуществляется путем надежного заземления сепараторов, ограждений токоведущих частей и блокировок. При открывании крышек и окон высокое напряжение отключается и электроды заземляются, поэтому все токоведущие части недоступны для прикосновения во время работы.

Наблюдение за работой, состоянием и положением электродов сепараторов осуществляется через смотровые окна в каждом рабочем блоке. Для освещения сепараторов внутри установлены лампочки. Смотровые окна, так же как и пульт управления, размещены на передней части сепараторов, на задней находятся приводные механизмы и высоковольтные установки.

Конструкция сепараторов выполнена в пылезащищенном исполнении, что предотвращает проникновение пыли из сепара-

тора на рабочие места. Предусмотрена возможность подключения каждого рабочего блока сепараторов к заводской системе вытяжной вентиляции.

Производительность сепараторов на различных материалах в зависимости от их вещественного состава и крупности составляет до 900—2000 кг/ч на 1 м длины электрода.

Барабанные электросепараторы ЭКС-1250 и ЭКС-3000 (см. табл. 5.1) применялись для доводки редкометалльных концентратов.

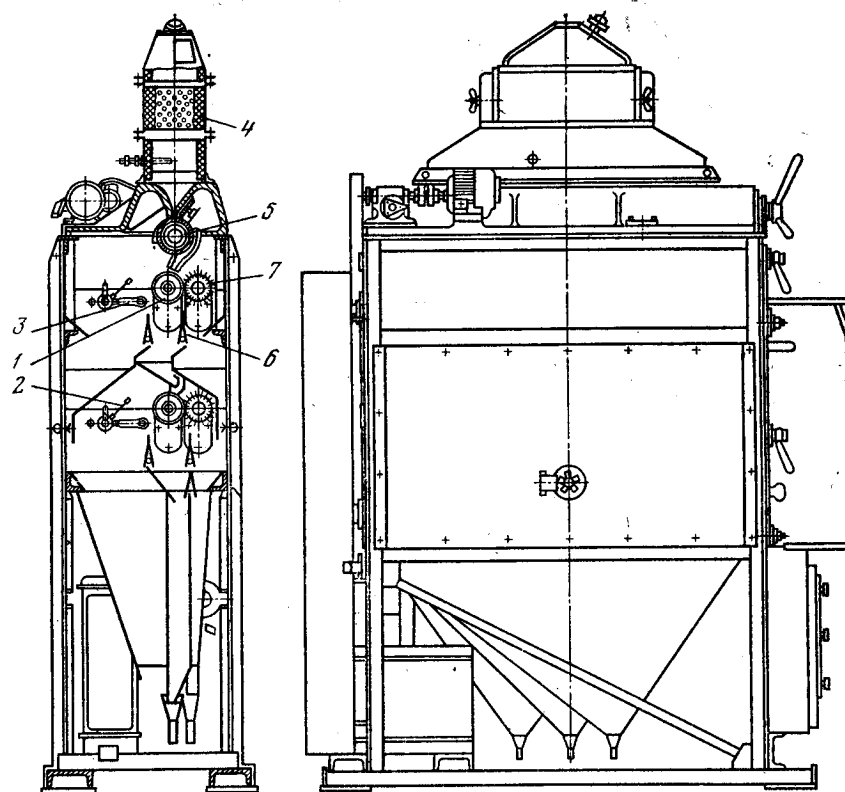


Рис. 5.4. Электросепаратор ЭКС-1250:

1 — осадительный электрод; 2 — коронирующий электрод; 3 — отклоняющий электрод; 4 — бункер; 5 — питатель; 6 — отсекающий; 7 — щетка

Сепаратор ЭКС-1250 (рис. 5.4) состоит из двух одинаковых каскадов. Верхний каскад предназначен для основной сепарации, нижний — для пересортировки. Если двух операций недостаточно для получения продуктов нужного качества, то после первого сепаратора продукты поступают в следующий сепаратор. Каждый каскад электросепаратора позволяет полу-

чить три продукта, причем два крайних выводятся наружу, средний продукт верхнего каскада поступает в нижний. Положение отсекающих электродов меняется в зависимости от требований предъявляемых к качеству того или иного продукта. Например, если высокие требования предъявляются к качеству проводящей фракции, то на нижний каскад для пересортировки направляется большая часть этой фракции.

Коронирующий электрод представляет собой нихромовую проволоку диаметром 0,4—0,5 мм, туго натянутую на держателях. Отклоняющий электрод — металлическая трубка или цилиндр из диэлектрика, вплотную к поверхности которого со стороны, противоположной барабану, натянута тонкая нихромовая проволока диаметром 0,3—0,4 мм.

Над питающим лотком у его конца устанавливается экранящая шторка в виде тонкой металлической пластины, шарнирно укрепленной вдоль осадительного электрода. Шторка предотвращает зарядку от короны материала, находящегося на лотке, так как заряженные частицы налипают на детали сепаратора и препятствуют нормальному прохождению материала.

Электросепаратор ЭКС-3000 имеет один каскад. Материал из бункера через течку подается на барабанный питатель и далее на осадительный электрод шириной потока 3 м. Такая ширина потока позволяет достигнуть в одном аппарате высокой производительности. Предусмотрено регулирование поступления материала по ширине перемещением по вертикали одной из боковых стенок течки. В сепараторе ЭКС-3000 в качестве коронирующего применен игольчатый электрод, так как проволока диаметром 0,4—0,5 мм на большой длине сильно вибрирует.

В коронно-электростатическом сепараторе оптимальных технологических показателей [40] удается достигнуть при определенном размещении электродов и питателя сепаратора (рис. 5.5). Ток короны зависит от взаиморасположения электродов, а именно уменьшается при увеличении напряжения на отклоняющем электроде и с приближением отклоняющего электрода к коронирующему.

Производительность существенно влияет на результаты электросепарации и зависит, помимо крупности и формы частиц, от соотношения содержания в исходном материале проводящих и непроводящих.

Опыт работы на барабанных коронно-электростатических сепараторах типа ЭКС-1250 и СЭС-1000 показал, что при разделении материала с преимущественным содержанием хорошо проводящих частиц уменьшение слоя материала на электроде и, следовательно, уменьшение производительности улучшают показатели сепарации. При пересортировке непроводящей фракции, содержащей небольшое количество хорошо проводящих частиц, однослойное питание ухудшает показатели сепарации. В работе [40] рекомендуется электросепарацию таких продуктов

проводить при многослойном питании. Оптимальную производительность для каждого конкретного случая необходимо определять опытным путем.

С помощью барабанных коронно-электростатических сепараторов легче получить чистую фракцию проводящих частиц, чем чистую фракцию непроводящих частиц. Это объясняется наличием проводящих частиц в слое непроводящих частиц, прижатых к барабану.

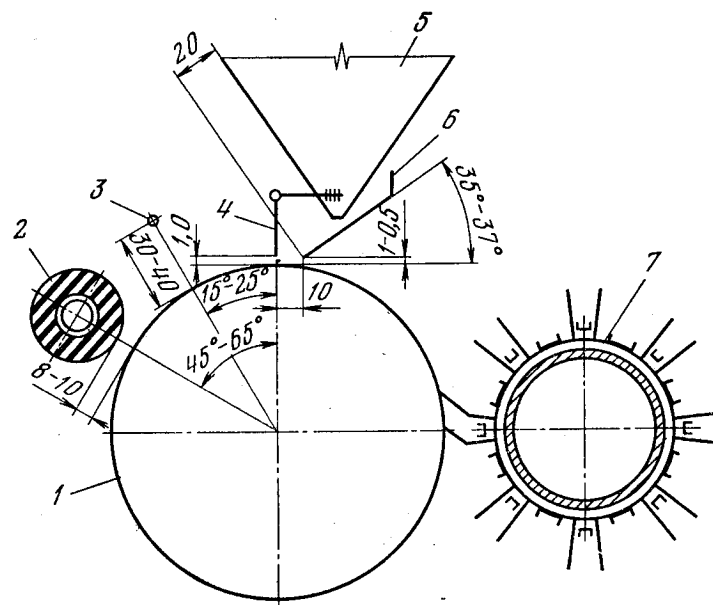


Рис. 5.5. Рекомендуемое положение узлов барабанного электросепаратора: 1 — осадительный электрод; 2 — отклоняющий электрод; 3 — коронирующий электрод; 4 — экранящая шторка; 5 — питающий бункер; 6 — направляющая; 7 — щетка

Траектории частиц, покидающих вращающийся барабан, зависят от их крупности и формы. Если на сепарацию направлять материал, предварительно классифицированный на вращающемся барабане, показатели сепарации улучшаются. Для такой классификации в многосекционных сепараторах могут быть использованы верхние блоки; сильные электрические поля при этом не создаются.

По технологии, предложенной Гипронеинеметаллорудом, институт Гипромашобогатение изготовил электросепаратор СЭП-1 (сепаратор электрический полевошпатовый), позволяющий отделять пыль и слюду (мусковит, биотит) при обогащении кварц-полевошпатовых руд крупностью 0—1,5 мм (табл. 5.2). В сепараторе (рис. 5.6) имеются две автономные технологиче-

Таблица 5.

Технические характеристики электросепараторов типа СЭП

Параметры	СЭП-1	СЭП-2
Производительность на один питатель, кг/ч	2000	2000
Число каскадов	3	3
Число блоков	6	8
Диаметр барабана, мм	150	300
Ширина питателя, мм	1000	1000
Частота вращения барабана, об/мин	40—420	40—420
Рабочее напряжение на электроде, кВ	+20—0—20	0—40
Температура материала, °С	До 200	До 200
Максимальная крупность сепарируемого материала, мм	1,5	1,5
Установленная мощность, кВт:		
высоковольтного питания	0,8	0,7
привода питателя	0,37	0,37
привода барабана (осадительного электрода)	0,4	0,4
нагревательных элементов в каждом блоке . .	7	7
Габаритные размеры, мм:		
длина	2750	2750
ширина	1690	2500
высота	3920	4790
Масса (без шкафа управления), т	4,83	8,9

ские нитки, смонтированные на общей раме. Каждая нитка имеет питатель 1, блок основной сепарации 2 и два блока перечистки 3 и 4. В трехпродуктовых блоках основной сепарации 2 и первой перечистки 3 слюда отделяется в электростатическом поле, отклоняющем ее от осадительного электрода. Отделение пыли осуществляется с помощью адгезионных сил, способствующих налипанию пыли на хромированный осадительный электрод. Вибрационные питатели, встроенные в эти блоки, обеспечивают равномерную подачу и трибозарядку материала.

Блок второй перечистки 4 — двухпродуктовый предназначен для отделения слюды в поле коронного разряда чередующейся полярности. В этом блоке слюда, лежащая на электроде, благодаря плоской форме перезаряжается медленнее, чем изометрические частички кварца и полевого шпата, и силами зеркального отображения прижимается к осадительному электроду. Высокое напряжение на коронирующие электроды чередующейся полярности подается от выпрямителя (схема со средней заземленной точкой). Высоковольтные источники встроены в раму 5 сепаратора СЭП-1.

Пыль с осадительного электрода в блоке основной сепарации и первой перечистки, а также слюда в блоке второй перечистки удаляются с помощью вращающейся щетки со съемными резиновыми лопастями. В сепараторе предусмотрены смотровые окна для визуального наблюдения за процессом сепарации.

От каждого блока выведены точки, позволяющие отбирать пробы.

Для отделения полевых шпатов от кварца и разделения полевых шпатов на микроклин и плагиоклаз в Гипронинметаллоруде и Гипромашобогатении создан электросепаратор СЭП-2 (см. табл. 5.2). В электросепаратор входят восемь блоков (рис. 5.7), в которых установлены осадительные электроды диа-

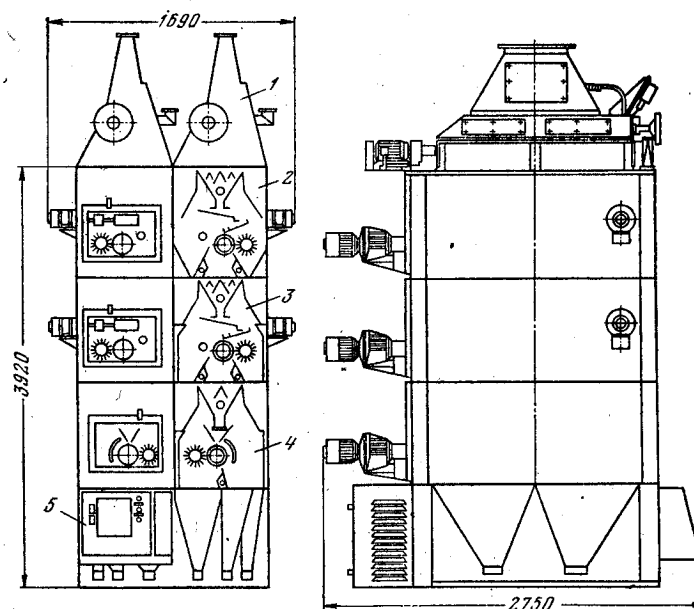


Рис. 5.6. Электрический сепаратор СЭП-1

метром 300 мм и электростатические отклоняющие электроды. Осадительный электрод снабжен отдельным приводом, состоящим из асинхронного двигателя и вариатора, что позволяет плавно регулировать частоту вращения каждого барабана. Материал подается на осадительный электрод вибрационным питателем с электромагнитным приводом. Конструкция сепаратора рассчитана на обогащение материала, нагретого до температуры 200° С; предусмотрены встроенные электронагреватели.

Два высоковольтных выпрямителя ПВС-40-10 (40 кВ; 10 мА) и схема разводки высоковольтных калейбей обеспечивают подачу высокого напряжения любой полярности на различные блоки.

В лабораториях используется электрический поисковый сепаратор ПС-1, на котором сепарируются небольшие пробы материала при производительности 30—50 кг/ч. Сепаратор односекционный, его габаритные размеры 520×370×530 мм. На

корпусе сепаратора (рис. 5.8) установлен приемный бункер, состоящий из воронки, конусного затвора и вибрирующего лотка. Для предотвращения налипания материала на лоток под действием электрического поля выпускное отверстие вибрирующего лотка экранировано металлической шторкой.

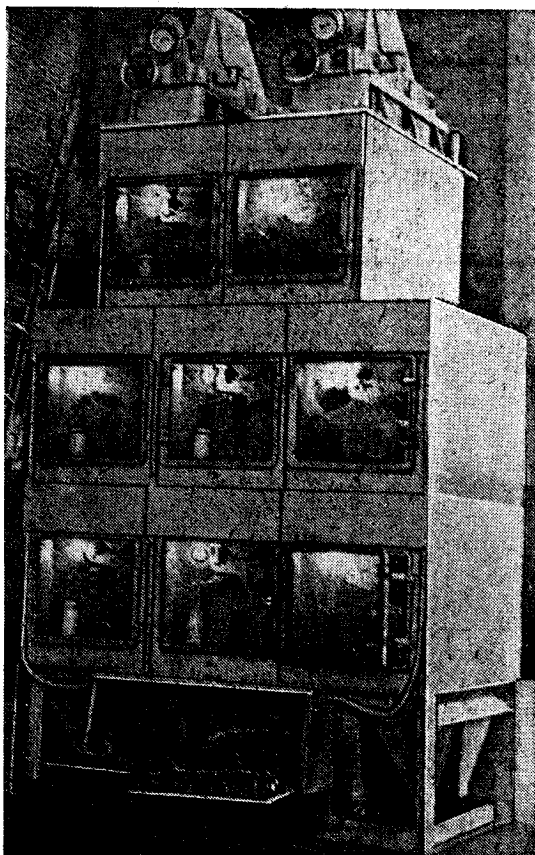


Рис. 5.7. Электрический сепаратор СЭП-2

Осадительный электрод 2 сепаратора представляет собой стальной цилиндр диаметром 150 мм и длиной 150 мм, установленный на стенках корпуса сепаратора 3. Осадительный электрод очищается вращающейся щеткой 4 с резиновыми лопастями.

Коронирующий электрод 5 — это константановая проволока диаметром 0,2—0,4 мм с винтовыми наконечниками, с помощью которых она закрепляется в гнездах траверсы. К одному из

гнезд траверсы, выполненной из органического стекла, подведено высокое напряжение.

В качестве отклоняющего электрода 6 использован диэлектрик, представляющий собой бакелитовый цилиндр диаметром 22 мм и длиной 200 мм, установленный в подвижных рычагах. Отклоняющий электрод вращается через ременную передачу. Подзарядка отклоняющего электрода высоким напряжением осуществляется от проводника, вмонтированного в изолятор.

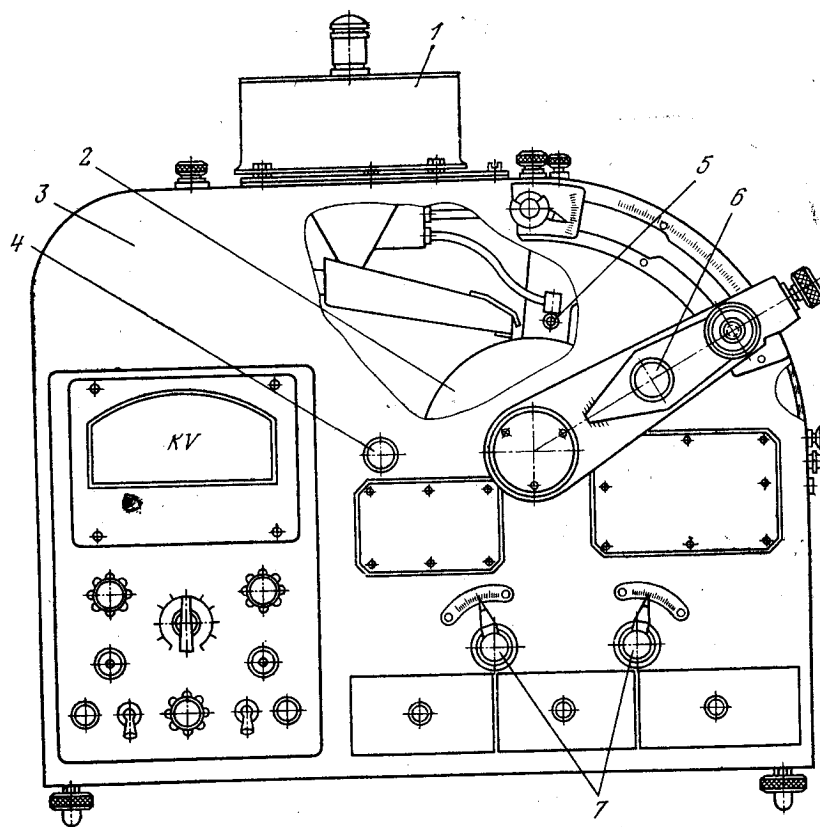


Рис. 5.8. Электрический лабораторный сепаратор ПС-1

Напряжение на электродах регулируется — от 8 до 27 кВ, максимальный ток нагрузки на стороне высокого напряжения — 500 мкА.

Сепарируемый материал разделяется на три фракции при помощи двух передвижных перегородок-отсекателей 7. Угол перемещения отсекающих перегородок регулируется и контролируется двумя шкалами. Положение отсекающих перегородок фиксируется зажимами. Для изменения высоты отсекающей перегородки снабжены наставками.

На сепараторе ПС-1 для выделения сульфидных минералов и самородных металлов, а также арсенидов, имеющих высокую удельную проводимость, устанавливается коронирующий электрод. Рекомендуемые частоты вращения при комнатной температуре материала приведены в табл. 5.3. В этих режимах в п

Таблица 5.3
Рекомендуемые частоты вращения барабана при работе на сепараторе ПС-1, об/мин

Крупность материала, мм	Коронирующий электрод	Коронирующий и электростатический электроды
-2,0+1,0	—	35 ÷ 60
-1,0+0,5	—	60 ÷ 90
-0,5+0,25	35 ÷ 60	80 ÷ 160
-0,25+0,15	50 ÷ 80	150 ÷ 300
-0,15+0,074	70 ÷ 120	260 ÷ 450
-0,074+0,044	100 ÷ 140	400 ÷ 550
-0,044+0,020	140 ÷ 200	500 ÷ 600

водящую фракцию извлекаются халькопирит, пирит, галениит, пирротин, пентландит, золото и серебро.

Если проводящие минералы имеют несколько меньшую удельную проводимость, устанавливается коронирующий электростатический отклоняющий электроды. К таким минералам относятся ильменит, рутил, колумбит, ильменорутит, лейкоксен, касситерит, гематит, магнетит, хромит, пиррохлор, лимонит. В коронно-электростатическом поле частоты вращения барабана выше, чем при одном поле короны (см. табл. 5.3). Более чистая проводящая фракция может быть получена при подогреве материала до +70—100° С, однако такой режим приводит к потерям проводящих минералов в непроводящую фракцию.

Барабанные электросепараторы в отдельных случаях имеют осадительный электрод с изоляционным покрытием, что обеспечивает высокое переходное сопротивление между электродом и частицей. Известен опыт применения таких электросепараторов для очистки и сортировки сельскохозяйственных культур [41]. На барабане, покрытом полихлорвиниловым лаком или пленкой, осуществлялось разделение семян по влажности.

Фирма «Карпко» (США) выпускает электросепараторы серии НТ, отличающиеся друг от друга числом барабанов. Каждый барабан имеет диаметр 15,25 см и длину 152,4 см.

Сепараторы фирмы «Карпко» серии НS имеют один, два и четыре барабана. Первоначально они предназначались для использования в качестве контрольных установок, а затем выяснилось, что по своим габаритам они очень удобны при работе с материалами, содержащими олово и вольфрам. Барабаны в сепараторах серии НS имеют длину 45,7 см и диаметр 15,25 см.

Сепараторы фирмы «Карпко» предназначены для переработки зернистых материалов крупностью 0,06—2,3 мм. При сепарации тяжелых минералов производительность аппаратов с барабаном длиной 152,4 см составляет примерно 2,5 т в час. Там, где имеется циркулирующая нагрузка, общая производительность снижается. Типичная фабричная установка, оборудованная этими сепараторами, имеет производительность по питанию 1000 т в сутки, при этом семь аппаратов используются для основной сепарации, четыре — для контрольной, три — для перечистки и один — для повторной перечистки.

Производительность промышленных сепараторов с длиной барабана 45,7 см составляет в среднем 0,75 т в час. Сепараторы серии НТ снабжаются загрузочными бункерами, рассчитанными приблизительно на 10 т материала. В случае отключения электроэнергии или другой аварии затворы, регулирующие питание, закрываются под воздействием пружины.

Рабочая зона освещается флуоресцентными лампами, установленными над каждым ротором.

Высоковольтные электроды сепараторов Карпко подключаются к источнику выпрямленного пульсирующего тока с резко выраженной формой пика. Считается [29], что для отделения проводящей фракции от непроводящей кривая тока не должна иметь прямоугольную форму. Поэтому в схеме питания высоковольтного электрода отсутствуют сглаживающие ток катушки индуктивности и конденсаторы. Один высоковольтный источник рассчитан на 16 барабанов длиной по 1,5 м.

Пульсирующее поле тока короны частотой 150—250 Гц используется для разделения мелких проводящих частиц крупностью 75 мкм [42]. Пульсация приводит к встряхиванию частиц, равномерному распределению их по поверхности барабана и отделению слипшихся частиц друг от друга. В подобном поле короны удалось выделить измельченную гематитовую руду, содержащую до 75% частиц размером менее 45 мкм. Частота вращения барабана диаметром 350—400 мм принималась 270—450 м/мин.

Можно отметить, что другие фирмы, например «Лурги» (ФРГ), используют генераторы высокого напряжения со сглаженной формой тока без пульсаций.

В связи с тем, что в основном барабан изнашивается при снятии налипших частиц, в электросепараторах Карпко часть прилипших частиц удаляется с помощью коронирующего электрода, подсоединенного к источнику переменного тока высокого напряжения. Этим методом обычно не удаляются все частицы, но сцепление с барабаном оставшихся частиц уменьшается, и они могут быть легко сняты мягкой щеткой.

Согласно данным фирмы «Карпко», выпускающей оборудование для гравитационных, магнитных и электрических методов обогащения, капиталовложения на электрическую сепарацию

составляют половину тех, которые требуются на магнитную сепарацию. Оборудование для электрической сепарации при производительности 500 т в сутки может обслуживаться одним человеком и иметь общую электрическую нагрузку 12 кВт. Расходы на обслуживание электросепараторов незначительны благодаря простоте их конструкции.

Сепаратор для исследований фирмы «Карпко» модель НР16-114 (рис. 5.9) спроектирован с учетом возможности фотографирования процесса. Аппарат позволяет изучать электросепарацию в электростатических полях и полях коронного разряда при широком изменении параметров. В сепараторе можно устанавливать барабаны различных диаметров, менять положение электродов, напряжение на электродах, полярность и конфигурацию поля. Сепаратор снабжается набором никелированных барабанов диаметром 152, 203, 254, 305, 356 см. В загрузочный бункер встроен электрический подогреватель, а для подогрева барабана используется инфракрасная лампа. Высоковольтный выпрямитель с максимальным рабочим напряжением 40 кВ встроен в раму сепаратора.



Рис. 5.9. Электрический сепаратор фирмы «Карпко»

5.4. КАМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОСЕПАРАТОРЫ

Частицы обрабатываемого материала в камерных сепараторах перемещаются при свободном падении между электродами.

Камерные электросепараторы с электростатическими электродами (рис. 5.10) просты по конструкции, но требуют большой высоты помещения. На электроды сепараторов подается постоянное напряжение до 100—200 кВ при расстоянии между ними 0,3 м и более.

В технологических схемах с сепараторами этого типа частицы обычно приобретают трибоэлектрический заряд во время транспортировки к электросепаратору. Заряженные частицы

через направляющее устройство засыпаются в промежуток между электродами. Скорость падения частиц зависит от начальной скорости, времени падения и сопротивления среды.

Условием успешного разделения частиц в камерных электростатических сепараторах со свободно падающим потоком явля-

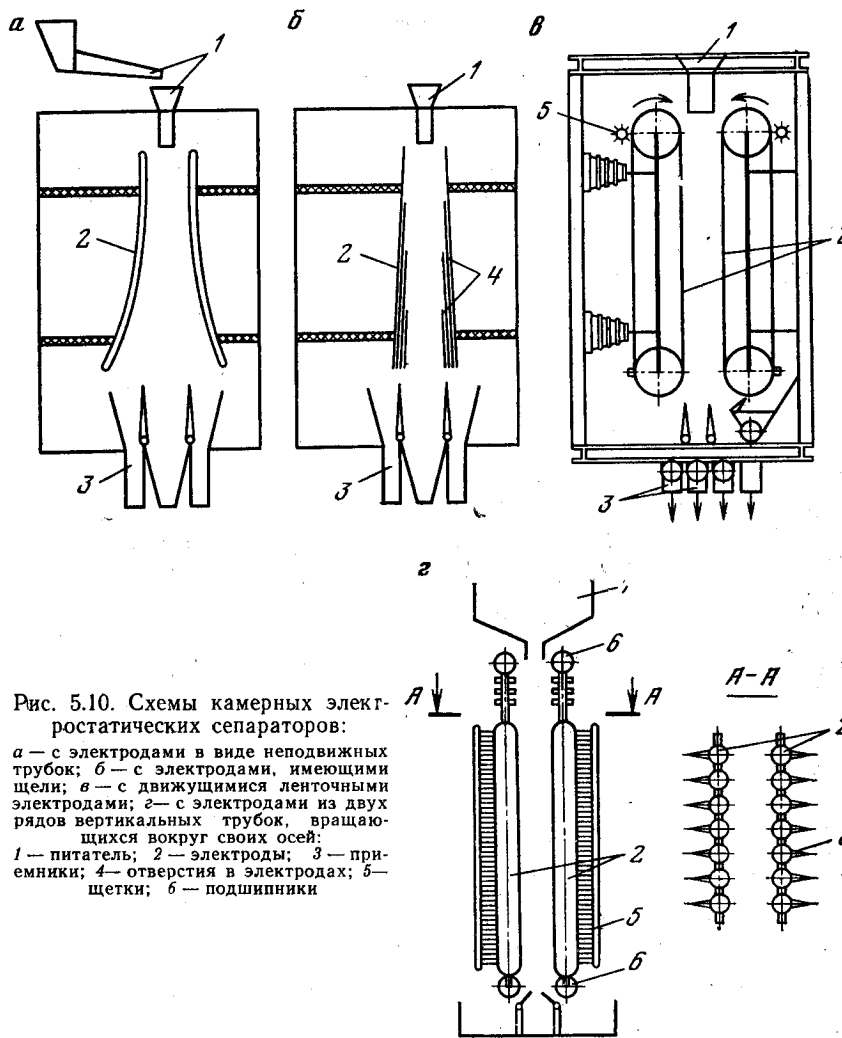


Рис. 5.10. Схемы камерных электростатических сепараторов:

a — с электродами в виде неподвижных трубок; *b* — с электродами, имеющими щели; *в* — с движущимися ленточными электродами; *г* — с электродами из двух рядов вертикальных трубок, вращающихся вокруг своих осей; 1 — питатель; 2 — электроды; 3 — приемники; 4 — отверстия в электродах; 5 — щетки; 6 — подшипники

ется незначительная начальная скорость. Горизонтальная составляющая начальной скорости нарушает разделение под действием электрических сил, а вертикальная составляющая уменьшает время воздействия внешнего электрического поля.

В камерных сепараторах взаимодействие электрических

зарядов отдельных частиц приводит к их слипанию. На отдельных участках электродов, в частности, в местах налипания частиц на электроды, наблюдается переход электростатического режима в коронный. Частицы с большими зарядами движутся к электродам по крутой траектории и ударяются о них. Учитывая, что эти факторы действуют сравнительно продолжительное время, в камерных электростатических сепараторах происходит перезарядка некоторых частиц.

На рис. 5.11 приведена фотография, полученная С. И. Лосаберидзе методом регистрации траекторий при исследовании

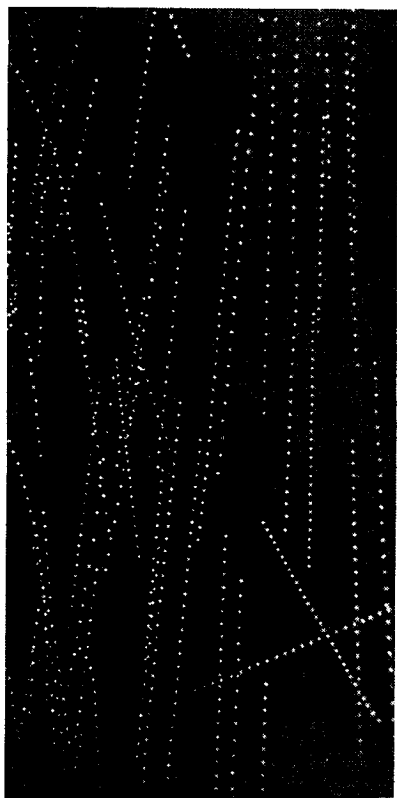


Рис. 5.11. Траектории частиц в средней части камерного электростатического сепаратора при расстоянии между электродами 0,3 м и напряжении 78 кВ

поведения частиц фосфата после столкновения с электродом в средней части камерного сепаратора. Некоторые частицы после контакта с электродом (расположен вдоль левого края) приобретают одноименный с ним заряд и отталкиваются, другие частицы не перезаряжаются и скользят вдоль электрода. Уменьшить число контактов частиц с электродами можно путем выбора оптимального рабочего напряжения и расстояния между электродами, а также выполнения электродов в виде вертикально расположенных трубок, несколько отогнутых в нижней части (см. рис. 5.10, а).

Отрицательные последствия, вызванные отскоком частиц от электродов, в определенной степени удается устранить при изготовлении электродов в виде щели и желобов [43].

Отверстия располагаются вдоль электродов перпендикулярно к траектории движения частиц и позволяют отбирать и отводить в приемники различные фракции обогащения (см. рис. 5.10, б).

Серия электростатических сепараторов производительностью до 25 т/ч разработана в Институте горно-химического сырья (ГИГХС). Сепараторы различаются числом секций электродов и их взаиморасположением

[12]. Однако эти конструкции малопригодны для перераспределения хвостов или концентратов, когда требуется последовательное соединение нескольких сепараторов. В таких случаях на обогатительных фабриках потребовались бы значительные производственные площади.

Камерные сепараторы используются в ФРГ [44] для обогащения калийных руд. Простейшие конструкции с неподвижными электродами вначале были заменены сепараторами с движущимися ленточными электродами (см. рис. 5.10, в), а в дальнейшем — электросепараторами с электродами из вертикальных трубок, вращающихся вокруг своих осей (трубчатый сепаратор) (см. рис. 5.10, г).

Электростатическое поле высокой напряженности без коронирования отдельных участков удается получать при чистых гладких поверхностях электродов, поэтому в последних двух конструкциях предусмотрена непрерывная очистка электродов от пыли с помощью щеток, установленных у поверхности движущейся ленты или вращающихся вокруг своей оси трубок.

Максимальная рабочая длина трубчатого сепаратора составляет 10 м, в то время как длина камерных сепараторов других конструкций не превышает 2,5 м. Удельная производительность трубчатого сепаратора для калийных руд, предварительно обработанных реагентами, согласно работе [44], достигает 20—30 т/ч на метр рабочей длины сепаратора, а для ленточных составляет 10—20 т/ч на метр. Трубчатые сепараторы работают при напряжении 100—125 кВ и при напряженности электрического поля 4—5 кВ/см, ток высокого напряжения составляет 1 мА; половина тока теряется в результате утечек.

Схема сепаратора с электродами, выполненными в виде цилиндров, приведена на рис. 5.12 [13]. Установлено, что показатели разделения в подобном сепараторе лучше, если материал подается не посередине, а ближе к одному из электродов, а также если электроды значительно отличаются по размерам. В таком сепараторе поверхность электродов очищается при их вращении с помощью притирочного устройства.

На установке, схема которой приведена на рис. 5.13, проводилась сепарация хлопковых волокон по их длинам [16]. В сепаратор материал подавался воздушной струей, из которой электрическое поле вытягивало длинные волокна. Сепаратор устанавливался в помещении с кондиционированием воздуха.

Разделение осуществлялось вследствие различных зарядов коротких и длинных (более 15 мм) волокон. Частицы приобретали биполярные заряды за счет самостоятельного разряда с вершин волокна, причем длинные волокна заряжались за меньшее время, чем короткие. В зависимости от величины напряжения, подаваемого на электроды, можно выделять волокна разной длины. При напряженностях электрического поля около 1 кВ/см время зарядки волокон существенно зависит от их дли-

ны, поэтому длинные волокна заряжались и отклонялись электрическим полем в промежутке между электродами, а короткие волокна продолжали двигаться в потоке воздуха. Таким образом, существующая для волокон зависимость величин биполярных зарядов от длины волокон позволяет волокнам разной скоростью двигаться в сторону возрастания напряженности электрического поля.

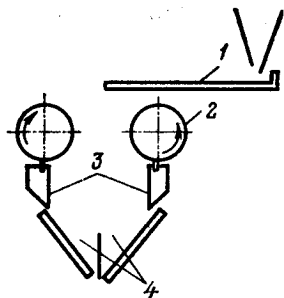
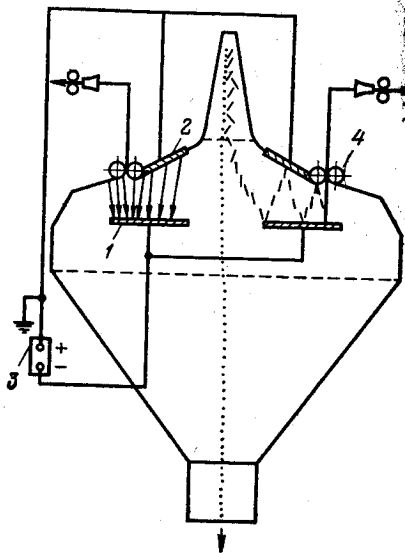


Рис. 5.12. Сепаратор с цилиндрическими электродами:

1 — питатель; 2 — высоковольтные электроды; 3 — щетки; 4 — приемники

Рис. 5.13. Электросепаратор для классификации волокон:

1 — высоковольтные электроды; 2 — заземленные электроды; 3 — источник высокого напряжения; 4 — валки для вывода волокон



Повышение напряженности до 2—3 кВ/см приводило к отклонению в электрическом поле как длинных, так и коротких волокон, так как время их зарядки становилось «соизмеримым».

Отклоненные частицы перемещались в горизонтальном направлении и собирались в месте наибольшей напряженности, где из них формировались нити. Средние скорости движения в направлении силовых линий составляли 5 м/с, а в направлении, перпендикулярном к силовым линиям, около 1 м/с.

Наряду с камерными электростатическими сепараторами применяются и камерные коронные. В камерных коронных сепараторах один из электродов — коронирующий — представляет собой рамку с натянутыми тонкими проволоками или лезвиями, установленную вертикально против заземленного осадительного электрода (рис. 5.14).

Камерные электросепараторы с коронирующими электродами имеют большую удельную производительность. Они применяются для разделения отдельных материалов, состоящих из компонентов, значительно отличающихся удельной массой, формой, а также электрическим сопротивлением.

В сепараторах материал при падении под действием силы тяжести в межэлектродном пространстве приобретает заряды, определяемые формулами (2.2), (2.6). Заряжаясь, частицы изменяют свою траекторию и направляются в различные приемники в зависимости от крупности, формы, диэлектрической проницаемости. Проводимость частиц не оказывает большого влияния на результаты сепарации в камерных коронных сепараторах, так как при падении частицы вращаются и на частях с любым сопротивлением заряды распределяются по всей поверхности. Чем больше заряд, приобретенный частицей в поле короны, тем раньше частица выносится на заземленный электрод.

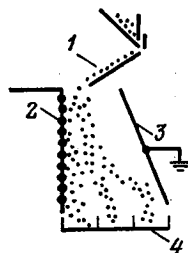


Рис. 5.14. Схема камерного коронного сепаратора:

1 — питатель; 2 — коронирующий электрод; 3 — осадительный электрод; 4 — приемники

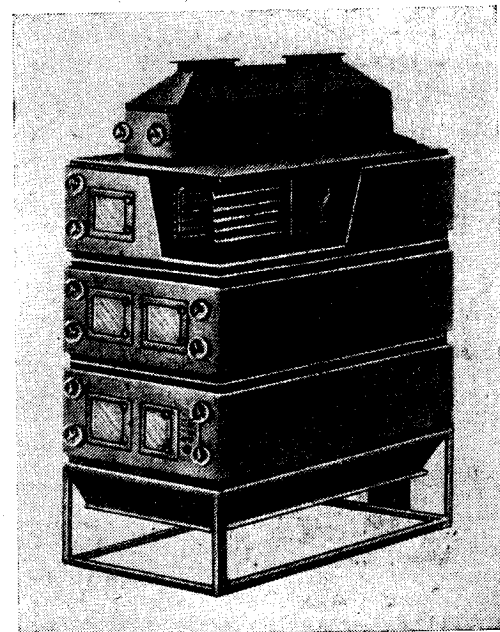


Рис. 5.15. Коронный сепаратор КМП-1

Основными силами, действующими на частицы в камерном коронном сепараторе, — сила электрического поля, определяемая зарядом частицы, сила сопротивления среды и сила тяжести. Причем сила, определяемая зарядом частицы, так же как и сила сопротивления среды, зависит от времени. Установлено, что показатели разделения частиц выше, если место загрузки находится вблизи коронирующего электрода. Однородные по минеральному составу частицы будут выходить за пределы заземленного электрода в разных точках; вверху — мелкие, внизу — более крупные. Действительно, как показано в работе [2], горизонтальная составляющая скорости движения частиц вдоль

силовых линий электрического поля пропорциональна радиусу частицы

$$v_r = Fq/6\pi\mu a \equiv a,$$

где μ — вязкость среды.

Вертикальная составляющая скорости под действием силы тяжести пропорциональна квадрату радиуса частицы

$$v_b = mg/6\pi\mu a \equiv a^2.$$

Частицы достигают осадительного электрода на расстоянии l от верхнего края, пропорциональном радиусу частицы, а именно

$$l = v_b t = sv_b/v_r \equiv a,$$

где s — расстояние, на которое частица перемещается по горизонтали.

Перемещению частиц в сторону осадительного электрода способствует электрический ветер, создаваемый коронирующими электродами.

На рис. 5.15 показан электрический сепаратор КМП-1, разработанный Гипромашобогатением. Он предназначен для классификации по крупности и насыпной массе металлических порошков, руд черных и цветных металлов. Изготовлен также сепаратор КМП, имеющий меньшие габариты и производительность (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Технические характеристики сепараторов КМП и КМП-1

Параметры	КМП	КМП-1
Производительность по исходному питанию, т/ч . . .	0,7	2—4
Число секций	3	3
Рабочая длина электродов, мм	—	2000
Рабочее напряжение на электродах, кВ	До 50	До 50
Крупность сепарируемого материала, мм	До 5	До 5
Установленная мощность, кВт	2,4	4
Габаритные размеры, мм:		
длина	2285	3170
ширина	1922	2180
высота	4456	5500
Масса, кг	2200	3800

В сепаратор КМП-1 входят питатель и три одинаковые рабочие секции, установленные на раме. В раму вмонтированы пульт управления и высоковольтная установка. Каждая секция состоит из осадительного электрода и проволочного коронирующего электрода рамной конструкции. Коронирующий электрод закреплен консольно, что дает возможность освободить лице-

вую сторону сепаратора и обеспечить удобство обслуживания. Расстояние между электродами может изменяться специальными механизмами. Для предотвращения налипания пыли осадительные электроды снабжены электромагнитными встряхивателями. Для подачи сепарируемого материала в любую точку между электродами служат подвижные тетки.

5.5. ЛОТКОВЫЕ ЭЛЕКТРОСЕПАРАТОРЫ

В лотковых сепараторах материал скользит под действием силы тяжести или вибрации по одному из электродов, который сделан в виде плоскости, установленной под соответствующим углом. Другой электрод размещен над этой плоскостью.

Модель лоткового сепаратора, у которой заземленные электроды изготовлены в виде усеченного конуса, показана на рис. 5.16. В сепараторе высоковольтные электро-

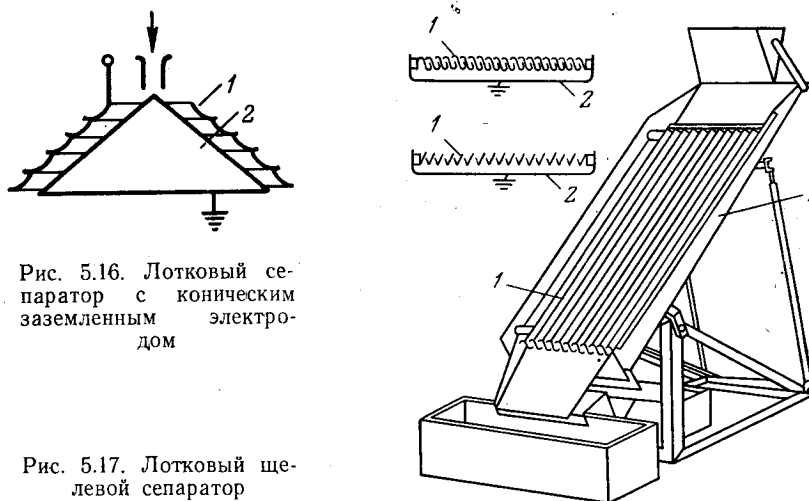


Рис. 5.16. Лотковый сепаратор с коническим заземленным электродом

Рис. 5.17. Лотковый шелевой сепаратор

статические электроды 1 представляют собой металлические листы, расположенные на некотором расстоянии друг от друга. Частицы материала подаются на вершину заземленного конического электрода 2. При перекачивании хорошо проводящие частицы отскакивают от этого электрода, пролетают в щели между высоковольтными электродами и скатываются вниз по их внешним поверхностям. В процессе скольжения материала по поверхности конуса уменьшается толщина его слоя, что способствует контакту частиц с заземленным электродом и повышает эффективность сепарации.

Для улавливания хорошо проводящих частиц высоковольтные электроды 1, установленные над заземленными плоскостя-

ми 2, изготавливаются в виде желобов различной формы (рис. 5.17). Проводящие частицы отклоняются к высоковольтному электроду и та часть из них, которая попадает в щели, улавливается желобами. Некоторые проводящие частицы, прежде чем им удастся попасть в желоба, перезаряжаясь многократно, отскакивают от высоковольтного и заземленного электродов. В желобах внешнее электрическое поле отсутствует и частицы спокойно скатываются в соответствующие приемники. Отдельно от них в конце заземленной плоскости выводятся непроводящие частицы.

Сепараторы, конструкции которых показаны на рис. 5.18, 5.19, пригодны только для грубого разделения частиц, имеющих большое отличие в проводимостях, так как они выделяют проводниковый концентрат, засоренный непроводящими частицами. Это, по-видимому, объясняется тем, что некоторые плохо проводящие частицы при перекачивании по заземленному электроду приобретают трибозаряд и отклоняются к желобам. Однако исключительная простота конструкции, отсутствие изнашивающихся и движущихся частей оправдывает в отдельных случаях применение лотковых сепараторов для разделения материалов по электропроводности.

В то же время известны многочисленные случаи удачного применения лотковых электросепараторов в промышленности для сепарации смесей плохо проводящих минералов, приобретающих при движении по заземленному лотку трибозаряды, достаточные для разделения минералов. Применение лотковых сепараторов в этом случае является перспективным.

В некоторых странах (СССР, Австралия, Индия) нашли распространение лотковые сепараторы, в которых заземленный электрод изготовлен с переменным радиусом кривизны (рис. 5.18). Такие сепараторы позволяют, в частности, осуществлять разделение циркона и рутила из прибрежного морского песка, так как при скольжении по лотку частицы циркона заряжаются отрицательно, а частицы рутила — положительно. После прохождения по заземленной пластине пути длиной 0,6 м частицы приобретают предельный заряд. В процессе движения частиц по пластине рутил концентрируется в верхнем слое, а циркон — в нижнем, поэтому отклоняющий электрод подсоединен к отрицательному полюсу источника высокого напряжения. Установлено, что если изогнутую часть нижнего электрода не заземлять, а подсоединять к положительному полюсу, то улучшаются технологические результаты сепарации. Рекомендуется создавать напряженность поля максимально возможной, т. е. близкой к пробивной. При наладке подбираются угол наклона листа, длина пути, проходимого частицей при ее движении вниз по лотку, высота падения от питателя до лотка. С уменьшением производительности сепаратора, составляющей в среднем 200—700 кг/ч на 1 м ширины

лотка, технологические показатели улучшаются. При двукратной перемалывке получался циркониевый концентрат с содержанием минерала 99% при извлечении около 90%.

Сепаратор, показанный на рис. 5.18, применялся и для отделения кварца от известковых пород.

Фирма «Рейгерт» при обогащении тяжелых минералов морских россыпей использует электростатические сепараторы с эллиптическими электродами, установленными над изогнутой в виде параболы заземленной плоскостью или над сеткой (рис. 5.19). Результаты сепарации зависят от положения

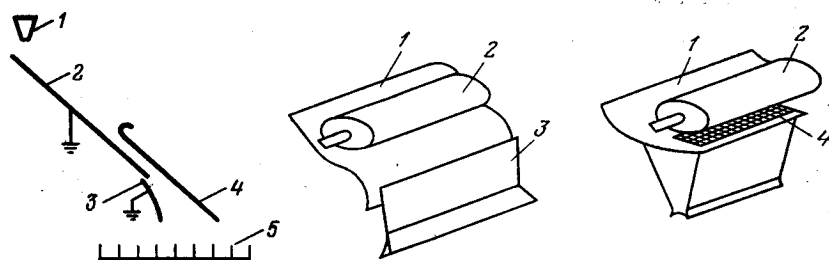


Рис. 5.18. Лотковый сепаратор с трибозарядкой:

1 — течка питателя; 2 — подготовительная плоскость; 3 — заземленный электрод; 4 — высоковольтный электрод; 5 — приемники

Рис. 5.19. Сепаратор с эллиптическим электродом:

1 — плоскость скольжения; 2 — электрод; 3 — отсекающий; 4 — сетка

эллиптического электрода относительно плоскости скольжения, поэтому электрод смонтирован с возможностью поворота вокруг своей оси и перемещения относительно плоскости. Сепараторы осуществляют разделение частиц по различию в диэлектрических проницаемостях ϵ ; частицы с большой диэлектрической проницаемостью (проводники) выталкиваются электрическим полем в правый приемник, а частицы с меньшей ϵ диэлектрической проницаемостью (непроводники) попадают в приемник под эллиптическим электродом.

Опытный завод Гипромашобогащения изготавливает трибоэлектрические сепараторы СТЭ (рис. 5.20), предназначенные для разделения плохо проводящих минералов, не имеющих существенного различия в электрической проводимости. В сепараторах СТЭ предварительно нагретый материал из бункера сыпается в течку питателя и далее на подготовительную плоскость. При перемещении по этой плоскости частицы материала благодаря трению друг о друга и о плоскость приобретают различные по величине и знаку заряды, одновременно расслаиваясь. Таким образом, в зону свободного падения между электродами частицы поступают с разной скоростью и по разным траекториям. Подготовительная плоскость

переходит в заземленный электрод, выполняемый в виде сегмента с регулируемым радиусом закругления.

Техническая характеристика трибоэлектрического сепаратора СТЭ

Производительность, т/ч	6
Крупность сепарируемого материала, мм	1,0—0,074
Ширина питателя, мм	2000×2
Рабочая длина электродов, мм	2000
Расстояние между электродами, мм	0—200
Угол наклона подготовительных плоскостей, градус	35÷45
Рабочее напряжение на электроде, кВ	До 20
Установочная мощность высоковольтной установки, кВт	0,8
Габаритные размеры, мм:	
длина	2890
ширина	2120
высота	4611
Масса, т	4,8

Разделение частиц, отличающихся формой или диэлектрической проницаемостью, осуществляется на сепараторе, предложенном Е. Н. Салтыковым и А. И. Месеняшиным (рис. 5.21).

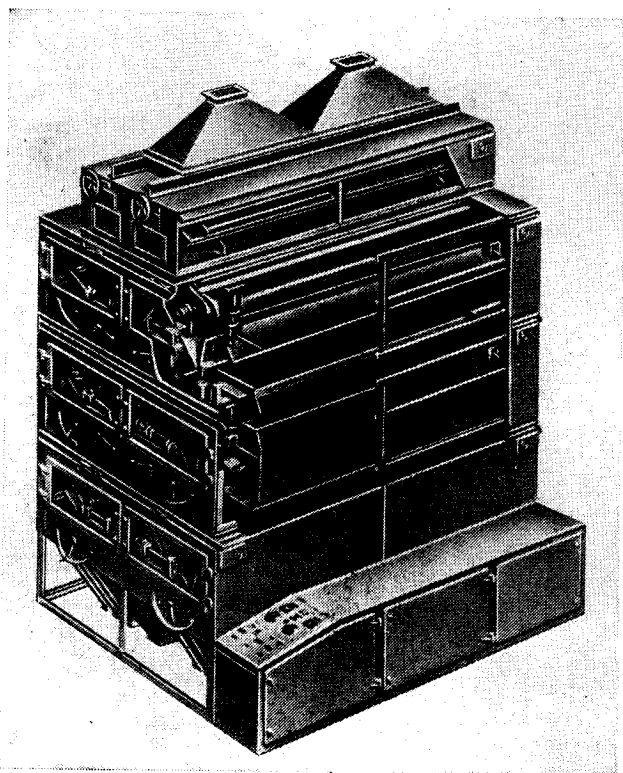


Рис. 5.20. Электросепаратор СТЭ

Электросепаратор используется для получения высококачественных слюдяных концентратов (вермикулитовых и мусковитовых) и приспособлен для улавливания отбрасываемых в разные стороны от высоковольтного электрода быстроперезаряжающихся частиц. Плоские частицы слюды имеют большую парусность и летают в воздухе; они обладают способностью быстро перезаряжаться «на лету» при электрическом разряде с самих частиц (см. п. 2.4), причем знак заряда имеет случайный характер.

Для определенной ориентации частиц в сепаратор материал подается в зону сепарации вибропитателем, обеспечивающим расположение частиц длинной осью вдоль электрического поля,

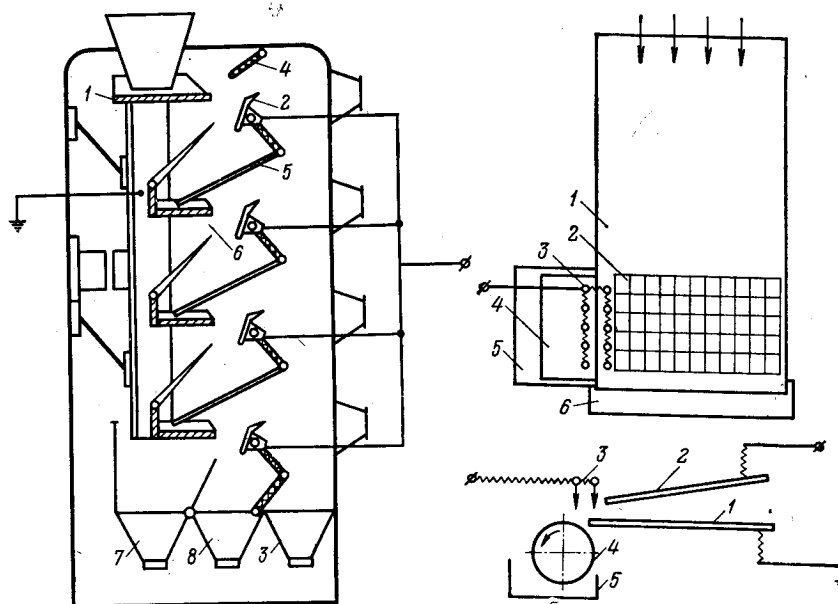


Рис. 5.21. Электрический каскадный сепаратор

Рис. 5.22. Коронно-вибрационный сепаратор

что имеет существенное значение, так как в зависимости от ориентации действующие на частицы электрические силы изменяются в десятки раз (см. п. 3.5).

Быстро перезаряжающиеся частицы после схода с лотков вибропитателей 1 устремляются к верхнему углу высоковольтного электрода 2, у которого образуется зона повышенной напряженности, и перелетают через него, попадая в приемник 3. Возврату частиц, перелетевших электрод, обратно в зону сепарации, препятствует ток короны, возникающий вокруг острия

верхней полки электрода. Некоторые частицы, долетев до верхней части высоковольтного электрода, отскакивают от него вертикальным направлением и, ударившись об отражатель или нижнюю поверхность плоскостей скольжения 5 и отразившись от них, попадают также в приемник 3. Другая часть быстро перезаряжающихся частиц отталкивается от высоковольтного электрода и пролетает через проходы 6 в приемник 7. Частицы округлой формы ударяются о вертикальную часть электрода 2, скользят по нему и далее попадают на нижерасположенные лотки вибропитателей 1. После многократной перемешки этот продукт собирается в приемник 8. При сепарации руды крупностью более 2 мм производят отсос воздуха из зоны сепарации через патрубки, что способствует транспортировке крупных быстро перезаряжающихся частиц в приемник 3.

На рис. 5.22 показан электросепаратор, в котором предварительное разделение материала осуществляется на лотке при его колебании. Колеблющийся лоток 1 является нижним заземленным электродом. Статический электрод 2 выполнен с наклоном в сторону коронирующих электродов 3, под которыми находится вращающийся заземленный барабан 4. Приемники 5 и 6 для сбора разделяемых компонентов расположены у торца и сбоку лотка 1.

Сепаратор испытывался при отделении полевых шпатов от частиц слюды. Исходный материал крупностью менее 1 мм подавался в несколько слоев на лоток 1, совершающий колебательное движение, обеспечивающее транспортировку материала по направлению к приемнику 5 и одновременное расслоение материала. Слюда «всплывала» при колебаниях лотка по дуговой траектории в плоскости, перпендикулярной к плоскости наклона лотка.

Когда материал доходит до статического электрода 2, частицы слюды устремляются к нему. У электрода 2 эти частицы перезаряжаются и, падая обратно к лотку, отклоняются в зону повышенной напряженности, т. е. под коронирующие электроды 3. Перемещение частиц (иногда после многократной перезарядки у электродов 1 и 2) способствует установке электростатического электрода с наклоном, создающим увеличение напряженности электрического поля в направлении приемника 6. Под коронирующими электродами 3 быстро перезаряжающиеся частицы налипают на барабан 4 и далее попадают в приемник 6. Материал, не отклоняющийся в электростатическом поле, под действием механических колебаний транспортируется в приемник 5.

Коронирующие игольчатые электроды в сепараторе колеблются вместе с лотком 1. Они закреплены на подвесках, которые позволяют совершать электродам свободные колебания. Колебания игольчатых электродов относительно лотка 1 и барабана 4 приводят к расширению зоны ионизации, «сдуву»

ионов с острых игл и увеличению тока короны. Эта конструкция способствует прерыванию тока полного пробоя между электродами 3, 1 и 4, так как при полном пробое электродинамические силы отбрасывают иглу от электродов 1, 4, что приводит к растягиванию и гашению электрической дуги.

В работе [29] описан электросепаратор (рис. 5.23), в котором заземленный электрод выполняется в виде слегка наклонной плоскости 1, вибрирующей под действием

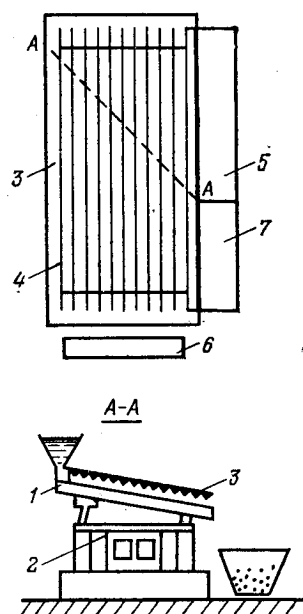
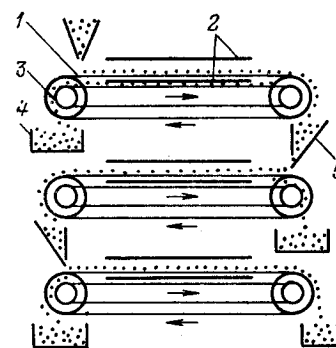


Рис. 5.23. Электросепаратор с заземленным электродом в виде вибрационного стола

Рис. 5.24. Ленточный сепаратор с плоскими электродами



приводного механизма 2. Сепарируемые частицы движутся в направлении вибрации плоскости, одновременно материал расслаивается, подобно тому как это происходит на вибрационных сепараторах или концентрационных столах. Высоковольтный электрод 3 выполняется из стержней 4 и устанавливается над вибрирующей плоскостью. Постоянное высокое напряжение подается импульсами с частотой 4 импульса в секунду и длительностью, составляющей 2—4% от общего времени цикла. При подключении напряжения проводящие частицы и непроводящие, получившие в результате трибозарядки соответствующий заряд, отрываются от вибрирующей плоскости и поднимаются к высоковольтному электроду в направлении, перпендикулярном к плоскости, а когда высокое напряжение отключается, то эти частицы вновь падают на плоскость несколько дальше по направлению ее наклона. Если напряжение на электрод подается импульсами, то слой частиц поддерживается как бы в

кипящем состоянии; часть компонентов материала многократно поднимается и падает, тогда как другие компоненты остаются на вибрирующей плоскости и уходят из-под взвешиваемых частиц. В результате частицы, отклоняющиеся в электрическом поле по траектории, близкой к $A-A$, попадают в приемник 6. Частицы, которые не отрываются электрическим полем, под действием вибрации и силы тяжести направляются в приемник 7. Приемник 7 предназначен для промпродукта.

На этом электросепараторе отделяются проводники от не проводников, а также непроводящие минералы друг от друга например, циркон от кварца и эпидота, рутил, фосфорит от кварца.

5.6. ЛЕНТОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСЕПАРАТОРЫ

Для питания ленточных сепараторов часто используется переменное высокое напряжение. Проводящие частицы и частицы с большой диэлектрической проницаемостью в переменном электрическом поле приобретают колебательное движение, что дает возможность отделить их от непроводящих частиц и частиц с меньшей диэлектрической проницаемостью.

Известен опыт применения в промышленности ленточных сепараторов для отделения графита от кварца и других минералов [45]. Исходное сырье, предварительно классифицированное по трем классам, подается на устройство (рис. 5.24). Лента бесконечной ременной передачи 1 перемещается между двумя плоскими электродами 2, подсоединенными к источнику переменного тока. Эта лента несколько наклонена вперед к плоскости чертежа. Когда исходный материал, находящийся на ленте, оказывается между электродами 2, графит в переменном поле начинает колебаться и с переднего края ленты падает на другую бесконечную ременную передачу 3, которая транспортирует графит в приемник 4. Промежуточный продукт ременной передачей 1 направляется в приемник 5 и далее подвергается перемещению на двух других ленточных сепараторах.

В некоторых конструкциях ленточных сепараторов используются силы, действующие на частицы в неоднородном электрическом поле. Как уже указывалось, одной из составляющих электрических сил является сила, стремящаяся (в воздухе) переместить частицы в зону с наибольшей напряженностью. Эта сила наиболее значительна для частиц с большой диэлектрической проницаемостью.

Обычно частицы имеют некоторый заряд q , и в поле E сумма сил, действующих на частицу,

$$\vec{F} = q\vec{E} + k \text{grad} |\vec{E}|,$$

где k — коэффициент, зависящий от диэлектрической проницаемости и формы частицы. В значительной степени исключить

влияние избыточного заряда на результаты сепарации можно в поле переменного напряжения.

Конструкция ленточного электросепаратора, в котором частицы с большой диэлектрической проницаемостью рассеиваются из зоны транспортировки, представлена на рис. 5.25, а [20]. В рабочую зону материал транспортируется при вращении металлических валиков 1 непрерывной лентой 2, выполненной из изоляционного материала. Валики заземляются. Electroды 3 и 4, подсоединенные к противоположным выводам повышающего трансформатора, установлены горизонтально на расстоянии 8—10 мм друг от друга. Верхний электрод 3 и нижний электрод 4 имеют центральный провод, перпендикулярно к которому подсоединяется ряд отрезков проволоки длиной 10 см для верхнего и 8 см для нижнего электрода (рис. 5.25, б).

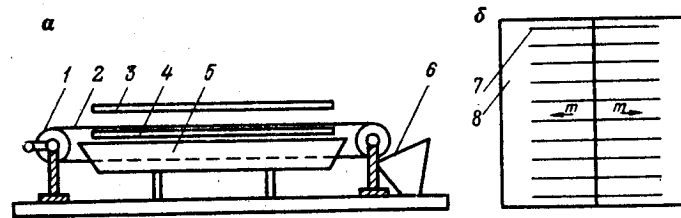


Рис. 5.25. Ленточный сепаратор с рассеивающим полем:

а — общий вид сепаратора; б — электрод сепаратора:
1 — вращающийся валик; 2 — непрерывная лента; 3, 4 — электроды; 5, 6 — приемники;
7 — провод; 8 — пластина из плексигласа

Расстояние между этими отрезками проволоки составляет 8 мм. Система проводов вмонтирована в плексигласовую пластину, установленную таким образом, что центральный провод электрода размещается вдоль направления движения материала по центру ленты 2.

Наибольшая напряженность электрического поля в электросепараторе создается у концов отрезков проводов, поэтому частицы с большой диэлектрической проницаемостью и электрической проводимостью перемещаются в направлении m и попадают в боковые приемники 5. Оставшиеся на транспортной ленте частицы направляются в приемник 6.

Сепаратор испытывался при обогащении сфалеритовой руды, содержащей 13,3% сфалерита. Получен концентрат с содержанием 73,5% сфалерита при извлечении 84,9%. В хвостах оставалось 3,1% сфалерита.

Переменное трехфазное высокое напряжение применяется в электросепараторе, схема которого приведена на рис. 5.26 [20]. Лента 1 перемещается между проволочными электродами 2, 3, 4 диаметром 0,1 мм, врезанными в желоба из плексигласа 5 и 6. Electroды 2, 3 и соответственно желоба 5 размещаются над транспортирующей лентой 1, приводимой в движение вра-

щением барабанов 7, а желоб 6 с электродом 4 устанавливается под лентой 1 и прижимается к ней пружинами 8. Расстояния между электродами 2, 3, 4 равны и составляют 15 мм при напряжении 10—15 кВ.

Когда на электроды 2, 3, 4 подается переменное трехфазное напряжение со сдвигом фаз 120° , возникает вращающееся электрическое поле. В определенные моменты времени наибольший градиент напряженности поля направлен вверх, вправо и влево от транспортирующей ленты. Поэтому частицы с большой диэлектрической проницаемостью и электрической проводимостью отрываются от ленты и выбрасываются в стороны к

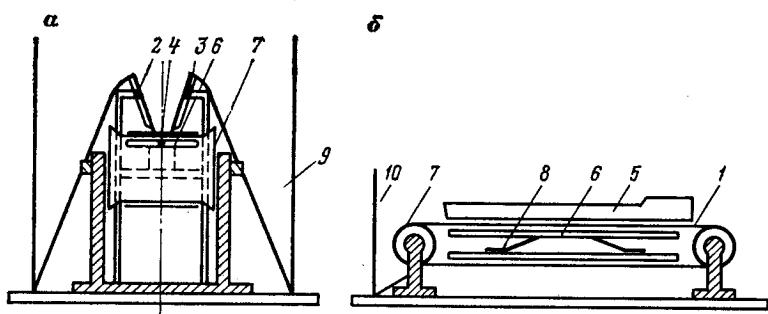


Рис. 5.26. Электросепаратор с вращающимся электрическим полем: а — поперечное сечение; б — продольное сечение

приемнику 9, а оставшийся на ленте материал ссыпается в приемник 10.

На сепараторе с вращающимся электрическим полем отделяются проводники (халькопирит, пирит) и полупроводники (сидерит, лимонит) от непроводников (кварц, кальцит, флюорит), а также непроводники со значительной разницей диэлектрической проницаемости, например перовскит ($\epsilon=130$) и кварц ($\epsilon=4,5$).

В электросепараторе для крупнокусковых материалов, предложенном Э. З. Школьниковым, А. И. Месеняшиным, Б. В. Шабловым, куски материала направляются в приемники с помощью механического устройства, которое управляется приборами, измеряющими величину электрического заряда. Для разделения используется разная смачиваемость материалов, приводящая к различной способности материалов удерживать на своей поверхности электрический заряд.

Макет сепаратора (рис. 5.27) включает ленточный конвейер 1 и расположенные по ходу движения материала 2 узел 3 для смачивания, воздуходувку 4 для сушки материала горячим воздухом, коронирующие электроды 5, измерительный узел с

электростатическим экраном 6 и сортировочное устройство 7 для направления кусков материала в бункера 8 и 9. На электроды 5 подается постоянное высокое напряжение от источника 10; узел 6 подключен к схеме 11 для измерения величины заряда (электрометру) и подачи команд на включение и отключение сортировочного устройства 7 (на рисунке изображено сопло, сдувающее минерал в бункер 9).

При испытаниях сепаратора осуществлялось отделение плоских кусков слюды от плоских кусков полевого шпата и кварца

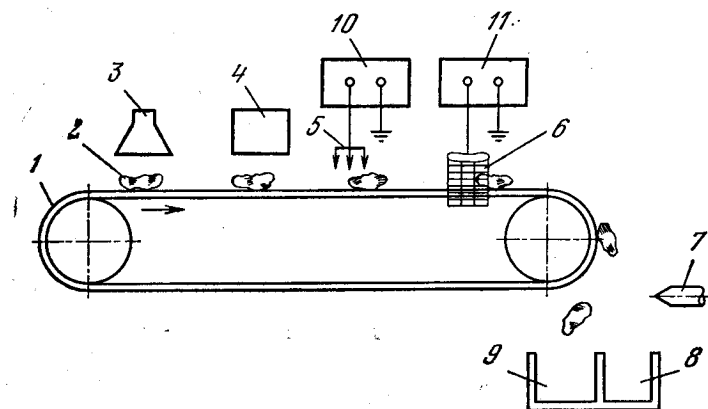


Рис. 5.27. Схема устройства для электросепарации крупнокусковых материалов

размером в поперечнике от 10 до 200 мм и толщиной от 3 до 50 мм. На ленточный транспортер 2, изготовленный из металлической ленты и движущейся со скоростью 0,1—0,3 м/с, помещались мокрые куски породы, которые передвигались к воздуходувке 4, где часть поверхности сушилась горячим воздухом. Полевой шпат и кварц смачиваются водой лучше, чем слюда, их поверхность через доли секунды или секунды вновь становится влажной. Наличие влаги на поверхности материала приводит к резкому уменьшению поверхностного электрического сопротивления. Далее лента перемещала куски материала под коронирующие электроды 5, выполненные в виде игл. Влажная поверхность полевого шпата и кварца быстро теряла объемные заряды, полученные в поле короны, а кристаллы слюды сохраняли их в течение нескольких секунд и фиксировались электрометром.

Показания электрометра при прохождении полевого шпата и кварца не превышали 75 мВ, а при прохождении слюды были не менее 1000 мВ, ввиду этого на одной установке без изменения пределов измерения можно осуществлять сепарацию в широком диапазоне крупности.

На этом сепараторе можно также отделять кристаллы слюды без дефектов (радиотехнической слюды) от слюды с изломами.

5.7. ЭЛЕКТРОСЕПАРАТОРЫ С ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ

Обрабатываемый материал в сепараторах с воздушным потоком находится во взвешенном состоянии.

Одним из видов этих аппаратов являются электросепараторы кипящего слоя. Сепарируемый материал поддерживается в псевдооживленном состоянии в виде кипящего слоя, создаваемого в камерах с газопроницаемым дном, через которое подается воздух или другой газ.

При определенной скорости потока газа, зависящей от массы и формы частиц, начинается вихревое движение частиц, называемое флюидизацией. Чем больше возрастает скорость потока газа после начала флюидизации, тем больше становится расстояние между отдельными частицами и вместе с тем объем слоя. Частота контактов частиц друг с другом достигает максимума вблизи «точки уноса», т. е. когда частицы покидают кипящий слой.

В кипящем слое проявляются два механизма электризации: трибозарядка и индукционная зарядка частиц, касающихся высоковольтного электрода. Частицы в кипящем слое неоднократно и интенсивно сталкиваются; величины зарядов определяются свойствами контактирующих тел и числом контактов. Две частицы при трибозарядке получают разноименные, но одинаковые по величине электрические заряды. Во взвешенном состоянии проводящие частицы, так же как и непроводящие, длительное время сохраняют свои заряды, поэтому в кипящем слое находятся разноименно заряженные частицы.

На каждую частицу в электросепараторах кипящего слоя действуют электрическая сила, сила тяжести и сила давления потока воздуха. Воздушный поток компенсирует силу тяжести частиц, благодаря чему направление движения частиц в электростатическом поле может быть обусловлено преимущественно величиной зарядов частиц. Это справедливо только до «точки уноса» частиц из кипящего слоя, так как при увеличении давления потока на частицы соотношение сил меняется не в пользу электрической силы.

Частицы, размер которых несколько десятков микрометров и менее, образуют агломераты, что затрудняет их сепарацию. Флюидизация позволяет получить свободные частицы, причем разделение частиц улучшается при уменьшении их влажности.

Электросепараторы с воздушным потоком могут использоваться при обогащении и классификации материалов крупностью менее 100 мкм. Это возможно вследствие того, что поток воздуха разрушает агломераты частиц, не допускает налипания

частиц на электроды и позволяет избежать трудностей при подаче сепарируемого материала тонким слоем и устранить беспорядочное движение частиц под влиянием турбулентного движения воздуха.

В камере кипящего слоя одновременно с зарядкой может осуществляться реагентная обработка и нагрев материала; последнее позволяет не предъявлять больших требований к влажности и температуре материала, поступающего в камеру.

На рис. 5.28 изображен электросепаратор [31] с прямоугольной камерой кипящего слоя, с двух разных сторон которой размещаются высоковольтные электроды 1 и приемники для продуктов 2, 3. Поток воздуха поступает через воздухопровод 4 и перфорированное дно 5,

создавая псевдооживленный слой материала. Электрод 6, выполненный в виде сетки или решетки, устанавливается несколько ниже верхней границы кипящего слоя и способствует зарядке легких частиц. В кипящем слое частицы, имеющие большие размеры и плотность, накапливаются у дна, а частицы меньших размеров и плотности оказываются в верхней области слоя. Легкие частицы благодаря контактной зарядке с электродом 6 приобретают заряд, достаточный для их отклонения к электродам 1. На электродах 1 и стержнях 7 легкие частицы разряжаются и падают в приемники 2 и 3.

В сепараторе можно классифицировать частицы, плотность которых отличается незначительно.

Опытная установка, схема которой приведена на рис. 5.29, использовалась для обогащения железных руд [46]. Кипящий слой создавался над пористой пластиной 1 из нержавеющей стали размером 42×15 см. Высокое напряжение (до 30 кВ) подавалось на эту пластину, лотки 2 заземлялись. Эксперименты осуществлялись на модели с неподвижными лотками, имевшими V-образную форму, напряжение к которым подавалось в течение 10 с. Промышленные установки могут быть снабжены устройством с лотками, движущимися со скоростью до 1 см/с.

Скорость псевдооживляющего воздуха у поверхности слоя для частиц диаметром 74—210 мкм составляла 15 см/с. Равнодействующая сил тяжести, давления воздушного потока и электрической должна быть направлена и вверх для сбора частиц, и вниз для того, чтобы частицы оставались в слое.

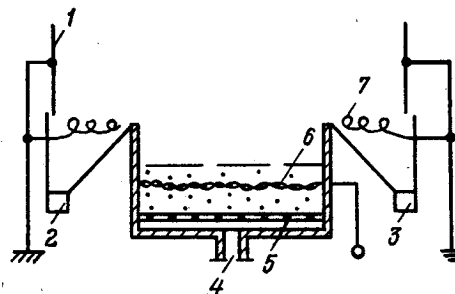


Рис. 5.28. Электросепаратор с камерой кипящего слоя с заряжающим электродом

Электризация частиц Fe_2O_3 осуществлялась в кипящем слое в результате контакта с находящейся под высоким напряжением пластиной 1. Частицы Fe_2O_3 приобретают заряд быстрее, чем непроводящие частицы кремнезема. Наряду с зарядкой частиц контактом в кипящем слое осуществляется трибозарядка частиц, причем частицы Fe_2O_3 получают положительный заряд, о чем свидетельствует влияние направления электростатического поля на показатели сепарации. Более высокое содержание Fe_2O_3 в концентрате наблюдается при положительной полярности пористой пластины. В этом случае контактная электризация и трибозарядка заряжают частицы Fe_2O_3 положительным

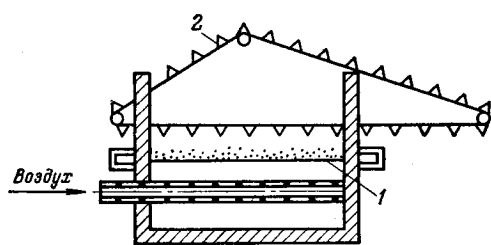
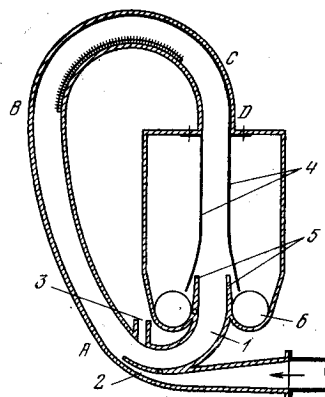


Рис. 5.29. Электросепаратор с камерой кипящего слоя с транспортирующей лентой

Рис. 5.30. Сепаратор «Электроциклолет»



зарядом. Когда пластина находится под напряжением отрицательной полярности, эти два явления для частиц Fe_2O_3 действуют в противоположных направлениях.

Схема сепаратора «Электроциклолет» приведена на рис. 5.30 [47]. Рабочая камера 1 сепаратора имеет вид овального замкнутого кольца, в нижнюю часть которого через отверстие 2 подается материал, а через трубопровод 3 — воздух или другой газ. Конструкция аппарата позволяет осуществлять зарядку частиц в поле короны или трибозарядку. В первом случае на участке BC против заземленной поверхности устанавливаются коронирующие электроды, во втором случае внутренняя поверхность на участке ABCD покрывается специально подобранным материалом. Руда, находящаяся в потоке воздуха, после зарядки попадает в зону сепарации, где смонтированы отклоняющие электроды 4. Отклонившиеся к электродам частицы отсекаются шиберами 5 и через отверстия 6 направляются в систему пылеосаждения. Часть материала, не получившая достаточного заряда, возвращается на повторную обработку.

На сепараторе в коронном режиме проведены давшие положительные результаты исследования по сепарации магнетитовой руды крупностью 0—0,062 мм, гепатитовой руды крупно-

стью 0—0,21 мм и пиритных огарков крупностью 0—0,5 мм. В самых тонких классах 37—44 и 0—37 мкм магнетитовой руды получены концентраты с содержанием железа более 68% при извлечении соответственно 97 и 84%.

При трибозарядке частиц хорошие результаты достигнуты на баритовых, флюоритовых и других рудах крупностью 0—0,5 мм. Для выделения микропорошков фракций крупностью 7—60 мкм создан флюидизационно-электростатический сепаратор [48]. Частицы заряжаются в камере кипения (рис. 5.31) путем контакта с зарядным электростатическим электродом (индукционная зарядка), а разделяются на требуемые фракции

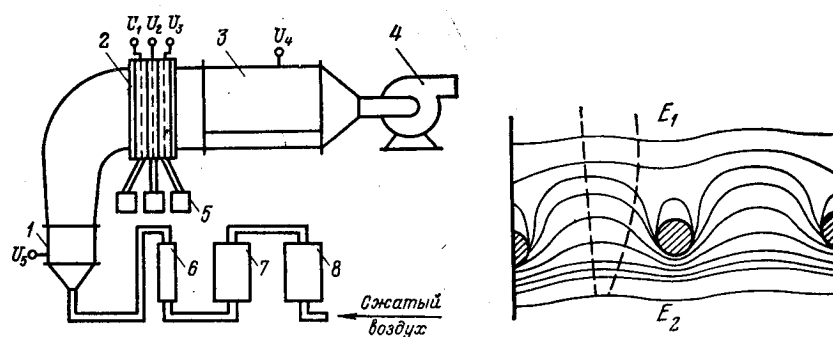


Рис. 5.31. Флюидизационно-электростатический классификатор:

1 — камера кипения; 2 — блок сетчатых электродов; 3 — электрофильтр; 4 — вытяжной вентилятор; 5 — сборник продуктов классификации; 6 — ротаметр; 7 — нагреватель воздуха; 8 — осушитель воздуха; U_1-U_5 — потенциалы соответственно сетчатых электродов, электрофильтра и зарядного электрода

Рис. 5.32. Электростатическое поле вблизи сетки с шириной ячеек 50 мкм и диаметром проволоки 10 мкм ($E_2/E_1=8$)

в ускоряющем фокусирующем электростатическом поле сетчатых электродов.

Исследования зарядки электрокорунда и карбида кремния показали, что индукционная зарядка обеспечивает наибольшее различие в удельных зарядах частиц разных размеров, чем трибозарядка и зарядка в поле короны. Помимо этого индукционная зарядка частиц в кипящем слое при нагреве порошков до 80—100°С позволяет достигнуть максимальных зарядов частиц. Величины зарядов существенно зависят от потенциала зарядного электрода, например при увеличении потенциала от 10 до 30 кВ заряд порошков возрастает в 10 раз.

Фокусирующее действие сетчатых электродов основано на том, что если сетка разделяет два электростатических поля различных напряженностей E_1 и E_2 , эквипотенциальные поверхности более сильного поля проникают по другую сторону сетки. Вблизи отверстия сетки существует повышенная напряженность

электростатического поля (рис. 5.32). Летящие заряженные частицы испытывают действие силы, направленной по нормали к эквипотенциальным поверхностям, в результате частицы с меньшей массой проскакивают сквозь сетку, а более крупные задерживаются. Сетчатые электроды периодически встряхиваются, и крупные частицы падают в приемники, установленные под электродами.

Оптимальные результаты сепарации достигаются при определенном соотношении напряженностей электростатических полей позади сетчатого электрода E_2 и перед ним E_1 и при определенных размерах ячеек и толщинах проволок сетки. Исследования показали, что отношение E_2/E_1 целесообразно выбирать от 4 до 10. Если же, наоборот, напряженности поля перед сеткой больше напряженности за сеткой, то сетка действует как рассеивающая система.

Под действием фокусирующего электрического поля частицы классифицированного порошка, имеющие размеры меньше размеров ячейки сетчатого электрода, проникают сквозь сетку. Самая тонкая фракция улавливается камерным электрофильтром 3 (см. рис. 5.31). Блок сетчатых электродов классификатора собран из трех кассет, переходящих внизу в приемники 5 для отбора более крупных классифицированных порошков.

Флюидизационно-электростатические сепараторы имеют сравнительно небольшую производительность, составляющую несколько килограммов в час на 1 м^2 сетчатого электрода. Однако выделяют микропорошки заданного гранулометрического состава: 20—28, 14—20, 10—14, 7—10 и 0—7 мкм с содержанием основных фракций 60—80% против 50—55% в продуктах гидроклассификации. Поэтому сепараторы этого типа нашли применение на ряде предприятий.

ГЛАВА 6

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРОВ

6.1. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ

Создание сильных электрических полей в электросепараторах обеспечивается высоковольтным оборудованием, к которому относятся изоляционные элементы, кабели, конденсаторы, генераторы высокого напряжения. Специальное электрооборудование обычно не разрабатывается для электросепараторов, так как могут быть установлены аппараты и конструкции, используемые в других областях техники: электроокраске, электрогазоочистке, рентгентехнике, сильноточной радиоэлектронике, ядерной физике и т. д. Этим в значительной степени объясняется надежность и компактность высоковольтного оборудования электросепараторов.

Высоковольтные источники питания электросепараторов выбираются прежде всего, исходя из необходимых величины и формы напряжения и тока.

Для получения постоянного напряжения применяются установки двух видов: электростатические генераторы и выпрямители с использованием трансформаторов и вентилялей. Электростатические генераторы имеют сравнительно высокую стоимость и небольшую мощность; последняя, как правило, недостаточна для промышленных сепараторов.

На рис. 6.1 приведены типичные схемы выпрямления переменного напряжения.

Напряжение от нуля до максимального рабочего регулируется на стороне низкого напряжения высоковольтного трансформатора с помощью автотрансформатора. Наиболее распространенной конструкцией для промышленных установок является повышающий трансформатор с твердой эпоксидной или масляной изоляцией в металлическом баке. Для лабораторных сепараторов используются высоковольтные трансформаторы с воздушной изоляцией.

В качестве выпрямителей (вентилей) в высоковольтных установках применяют кенотроны, газотроны и полупроводниковые диоды.

Кенотрон является прибором с высоким вакуумом; ток в нем создается за счет термоэлектронной эмиссии с нагретого катода. Высоковольтный кенотрон характеризуется током насыщения, имеющим порядок 200—400 мА при нормальном накале для стандартных типов этих вентилялей (В-1-0,1/30, КР-110,

КРМ-110, КРМ-125, КРМ-150). Ток насыщения зависит от температуры катода и резко снижается при уменьшении последней; для надежной работы следует поддерживать номинальный ток накала катода. В ненасыщенном состоянии сопротивление кенотрона практически постоянно и оценивается величиной в несколько килоом. В режиме насыщения внутреннее сопротивление кенотрона резко нарастает, внутреннее падение напряжения увеличивается от единиц до десятка и более киловольт, в ре-

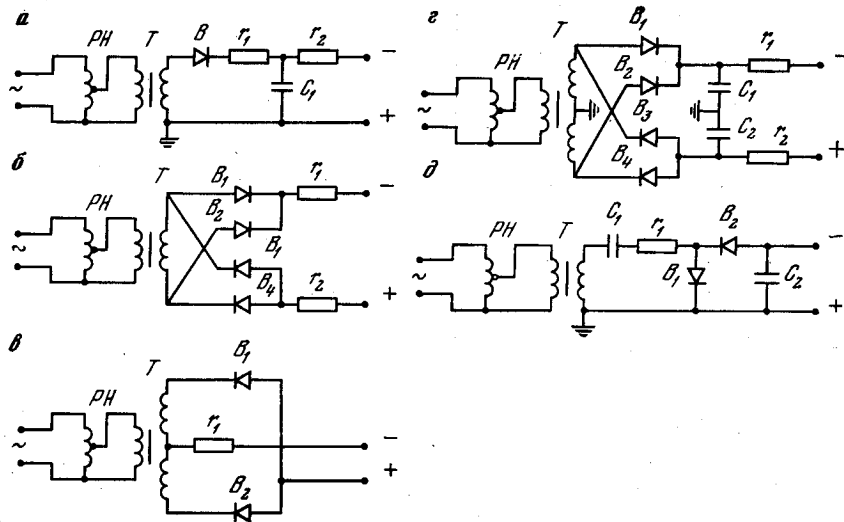


Рис. 6.1. Электрические схемы выпрямления переменного напряжения: а — однополупериодная схема; б — мостовая схема; в — двухполупериодная схема со средней точкой трансформатора; г — двухполупериодная схема со средней заземленной точкой; д — схема удвоения напряжения; РН — регулятор напряжения; Т — высоковольтный трансформатор; V_1 — V_4 — вентили; C_1 — C_2 — конденсаторы; r_1 — r_2 — сопротивления ограничительные

зультате чего анод греется под воздействием электронной бомбардировки и становится источником рентгеновских лучей, вредных для окружающего персонала. Через кенотрон длительно можно пропускать ток, среднее значение которого практически в 7—10 раз меньше тока насыщения (около 30 мА). Катод нагревается от трансформатора накала, обладающего необходимой изоляцией между обмотками.

Высоковольтный газотрон принадлежит к группе ионных приборов с невысоким вакуумом (10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст.). При наличии нагреваемого катода в газотроне в дополнение к термоэлектронной эмиссии с катода происходит ионизация газа (пары ртути). Ток высоковольтного газотрона в основном определяется интенсивностью этого ионизационного процесса и может достигать многих ампер; внутреннее сопротивление ма-

ло. Преимуществом газотронов является большая пропускная способность по току, а существенным недостатком — необходимость поддержания определенной температуры для создания оптимальных условий при ионизации.

Германиевые, кремниевые и селеновые диоды находят все большее применение в выпрямительных высоковольтных установках. Диоды имеют ряд технических преимуществ: большую пропускную способность по току, простоту конструкции, отсутствие каких-либо устройств накала и подогрева, значительный срок службы.

Полупроводниковые выпрямители на несколько десятков киловольт состоят из диодов, включенных последовательно. Такие выпрямители собирают из однотипных по характеристикам диодов для обеспечения равномерного распределения напряжения между ними. Последовательно включенные диоды шунтируются цепочкой резисторов, а группы диодов шунтируются конденсаторами. При медленных изменениях напряжения равномерность распределения напряжения по цепочке вентиля обеспечивается сопротивлениями, а при быстрых — емкостями.

Генераторы высокого напряжения почти неизбежно работают в условиях возникновения искровых и дуговых разрядов, сопровождаемых сложными переходными режимами, перенапряжениями и токовыми перегрузками. Перенапряжения и токовые перегрузки ограничивают введением в цепи высокого напряжения специальных ограничивающих высокоомных сопротивлений и шунтированием обмотки низшего напряжения нелинейными высокоомными сопротивлениями. Ограничительные сопротивления служат также для уменьшения тока до безопасной величины. Наряду с резисторами ток в схемах ограничивает и внутреннее сопротивление вентиля.

В схеме с одним выпрямителем (рис. 6.1, а) ток через вентиль проходит только в продолжении одного полупериода переменного тока (однополупериодное выпрямление). При таких условиях высокое напряжение получается пульсирующим (прерывистым). В однополупериодной схеме мощность трансформатора необходимо выбирать в 3,5 раза больше, чем мощность, потребляемую нагрузкой, а вентили должны выдерживать обратное напряжение $U_{обр}$ с большим запасом, а именно

$$U_{обр} = 3,14U_0,$$

где U_0 — выпрямленное напряжение.

Полярность схемы зависит от того, какой выход выпрямителя подключен к выводу трансформатора.

В тех случаях, когда по роду нагрузки пульсации выпрямленного напряжения нежелательны и должны быть ограничены, применяются сглаживающие фильтры. Простейшим фильтром является конденсатор C_1 , включенный параллельно нагрузке.

Сглаживающее действие конденсатора состоит в том, что в момент повышения пульсирующего напряжения конденсатор дополнительно заряжается, а в момент снижения этого напряжения конденсатор разряжается, поддерживая напряжение на нагрузке. Следовательно, напряжение на нагрузке при наличии конденсатора изменяется в меньших пределах, чем при отсутствии его. Сглаживает пульсации и емкость высоковольтного кабеля, соединяющего выпрямительную установку и отклоняющие электроды. При больших емкостях C_1 и сопротивлениях r_1, r_2 пульсация напряжения оказывается достаточно малой. Мостовая и двухполупериодная со средней точкой схемы (см. рис. 6.1, б, в) позволяют использовать обе полуволны переменного напряжения, поэтому мощность, а следовательно, габариты и масса повышающего трансформатора для этих схем необходимы меньшие, чем для однополупериодной. Пульсации напряжения в схемах (см. рис. 6.1, б) тоже значительно меньше, чем при однополупериодной.

Обратное напряжение на вентиле в двухполупериодной схеме такое же, как в однополупериодной, а в мостовой вдвое меньше, чем в той и другой схемах

$$U_{\text{обр}} = 1,57U_0.$$

Когда в одной рабочей зоне используют напряжения положительной и отрицательной полярности, например в схеме с чередующейся полярностью коронирующих электродов, целесообразно применять схему, показанную на рис. 6.1, г. Подсоединение рядом размещенных высоковольтных электродов к разным выпрямительным установкам является недопустимым, так как в случае возникновения искры между электродами в установках появляются напряжения, значительно превышающие нормальные эксплуатационные значения и приводящие к пробое изоляции. Пробой между электродами в схеме (рис. 6.1, г) не вызывает аварии, так как возникновение искры приводит к падению напряжения в высоковольтной части схемы.

На рис. 6.1, д представлена схема выпрямления и удвоения напряжения. Одной полуволной переменного тока через вентиль V_1 происходит зарядка конденсатора C_1 . Вторая половина волны переменного тока запирается вентилем V_1 , но пропускается на емкость C_2 через выпрямитель V_2 и, таким образом, накладывается на высокое напряжение, уже имеющееся на конденсаторе C_1 . Постоянное напряжение на нагрузке в этой схеме близко по величине удвоенной амплитуде напряжения трансформатора.

Вид схемы выпрямления в значительной степени зависит от схемы включения обмотки высшего напряжения трансформатора и изоляции этой обмотки относительно земли (полностью изолирована, однополюсно заземлена, заземлена средняя точ-

ка). Необходимо иметь в виду, что в схемах с конденсаторами в режиме запирающего на вентиль ложится напряжение, равное удвоенному напряжению конденсатора, заряжаемого через рассматриваемый вентиль. Поэтому к конденсатору можно прикладывать напряжение, не превышающее половины номинального напряжения вентилей.

Приведенные выше схемы выпрямления применяются и в устройствах, у которых на первичную обмотку повышающего трансформатора подается переменное напряжение высокой частоты. Использование высокочастотной схемы позволяет уменьшить габариты повышающего трансформатора и сглаживающих конденсаторов. Кроме того, высокая частота обеспечивает более гладкую форму кривой выпрямленного напряжения.

Ламповые генераторы высокой частоты благодаря обратной связи могут монтироваться таким образом, что при коротком замыкании на стороне высокого напряжения в цепи устанавливается ток короткого замыкания, равный нулю. Это повышает надежность работы электрогенератора и безопасность обслуживающего персонала при случайном прикосновении к токоведущим частям.

Отечественная промышленность выпускает высоковольтные выпрямители, некоторые из них пригодны к использованию для электросепараторов.

Выпрямительная установка ВС-20-10 (табл. 6.1) изготавливается заводом «Мосрентген». Схема установки мостовая с четырьмя кенотронами типа В-1-0,1/30 и с возможностью заземления любого полюса. Сглаживание напряжения осуществляется емкостным фильтром.

Преобразователи ПВС-40-6 и ПВС-60-10 (см. табл. 6.1) выпускаются опытным производством Института электронной технологии (г. Тбилиси). Высокое напряжение от повышающего трансформатора подается на выпрямительный мост, собранный на кремниевых выпрямительных столбах КЦ 105 Д (Д 1008Б) и подключенных параллельно им керамических конденсаторах КВИ-3-12-1000.

Выпрямительная установка ВС-50-50 (см. табл. 6.1) завода «Мосрентген» обеспечивает стабилизацию выходного напряжения до 2,5% при значительном изменении сетевого напряжения. В установку входят щит с аппаратурой управления и защиты и шкаф с высоковольтно-выпрямительным устройством, в котором использованы четыре кенотрона КРМ-150 и высоковольтные конденсаторы фильтра. Высоковольтный трансформатор и четыре трансформатора накала помещены в бак, заполненный трансформаторным маслом.

Выпрямительная установка В-140-5-2 собрана по однополупериодной схеме и состоит из высоковольтного трансформатора, кенотрона КР-220, трансформатора накала кенотрона и настенного щита управления.

Параметры	ВС-20-10	ПВС-40-6	ПВС-60-10	ВС-50-50	В-140-5-2
Номинальное выпрямленное напряжение (max), кВ	20	40	60	50	140
Номинальный выпрямленный ток (среднее значение), мА	10	6	10	50	5
Напряжение питающей сети, В	220	220	220	220	220
Частота питающей сети, Гц	50	50	50	50	50
Потребляемая мощность, В.А	800	400	600	1000	1000
Схема выпрямления	Мостовая на кенотронах	Однополупериодная полупроводниковая	Однополупериодная полупроводниковая	Мостовая на кенотронах	Однополупериодная на кенотроне
Габаритные размеры, мм	610×220×570	290×290×460	330×330×490	800×1200×1800; 785×450×1600	350×250×160
Масса, кг	60	45	62	504 (со шкафом управления)	150

6.2. ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОМ НАПРЯЖЕНИИ

Особенностью измерения ряда технологических параметров электросепарации является то, что их надо проводить в схемах высокого напряжения. С этой целью могут быть использованы измерительные приборы низкого напряжения, обычно работающие в комплексе со специальными вспомогательными высоковольтными устройствами, например делителями напряжения, трансформаторами. Однако имеются измерительные приборы специального назначения, предназначенные для применения лишь при высоком напряжении, такие, как шаровые разрядники.

В промышленных сепараторах о величине напряжения, подаваемого на электроды, обычно судят по показаниям вольтметра в первичной цепи повышающего трансформатора (рис. 6.2). Вольтметр градуируется при наладке сепаратора по

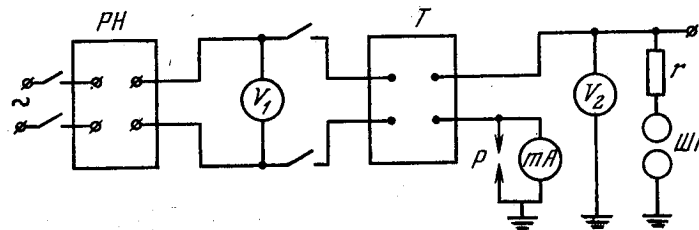


Рис. 6.2. Включение измерительных приборов для измерения высокого напряжения:

РН — регулятор напряжения; Т — высоковольтный источник; V_1 — вольтметр; V_2 — киловольтметр; mA — миллиамперметр; ШР — шаровой разрядник; r — защитное сопротивление; P — низковольтный разрядник

показаниям приборов, подключаемых непосредственно к высоковольтным электродам. Градуировка сводится к установлению зависимости (иногда в виде кривой) между напряжением на электродах и напряжением в первичной цепи повышающего трансформатора. Эта зависимость будет различной при подключении к высоковольтной схеме электродов разных конструкций и определяться их числом и взаиморасположением вследствие изменения падения напряжения в реактивности рассеяния трансформатора при изменении его нагрузки. Кроме того, нелинейные характеристики стали трансформатора, короны и вентилей приводят к непостоянству отношения напряжений при изменении их величин; форма кривых напряжения на высоковольтной и низковольтной сторонах в большинстве случаев несинусоидальна и неодинакова. Поэтому градуировать вольтметр в первичной цепи повышающего трансформатора следует в условиях, аналогичных последующей работе.

Серийными приборами для непосредственного измерения

высокого напряжения являются электростатические вольтметры (определяют действующую величину напряжения). Например, трехпредельный киловольтметр С-96 с непосредственным отсчетом имеет шкалы измерения с верхними пределами 7,5; 15; 30 кВ.

Электростатические вольтметры основаны на использовании силы взаимодействия между двумя электродами в электрическом поле измеряемого напряжения. Эта сила взаимодействия будучи пропорциональна квадрату напряжения между электродами, действует на подвижную систему прибора и уравновешивается механическим противодействующим моментом (сопротивлением закручиваемых металлических нитей, подвешиваемых грузов, пружин). При измерении постоянного напряжения отклонение электрода измерительного механизма не зависит от полярности.

Большое преимущество электростатических вольтметров состоит в том, что они очень мало нагружают измеряемую цепь. Такое требование ставится прежде всего при измерении напряжения маломощных источников постоянного напряжения, а также электростатических зарядов. Нагрузка на источники постоянного напряжения возникает только в момент заряда емкости вольтметра, подключаемого к цепи высокого напряжения.

Простым устройством, обеспечивающим практически приемлемую точность измерения высокого напряжения, является шаровой разрядник. С помощью шарового разрядника измеряется амплитудное значение напряжения с погрешностью, не превышающей $\pm 3\%$. Напряжение, при котором произошел разряд, а следовательно, и измеряемое напряжение определяются по специальным таблицам (см. ГОСТ 17512—72) в зависимости от расстояния между шарами, диаметра и способа их включения.

Разрядное напряжение в газах зависит от давления, температуры и влажности, поэтому данные стандартных таблиц соответствуют нормальному давлению воздуха 760 мм рт. ст. и нормальной температуре 20°C . Влияние влажности воздуха на разрядное напряжение в однородных полях при обычном ее изменении ничтожно, поэтому в таблице оно не учитывается.

Шаровые разрядники довольно чувствительны к воздействию внешних полей и соседних предметов, имеющих потенциал земли. Обычно они применяются для градуировки других измерительных устройств, так как каждый их пробой требует отключения источника напряжения.

Приборы для непосредственного измерения высокого напряжения являются громоздкими и дорогими; некоторые приборы, например осциллографы, имеют изоляцию, рассчитанную на несколько киловольт. Поэтому при измерении высоких напряжений широко применяются делители напряжений и добавочные сопротивления.

Делители напряжений состоят из цепочки последовательно соединенных активных сопротивлений или емкостей, а иногда из их комбинаций и включаются между проводом, находящимся под высоким напряжением и землей. Принципиальная схема делителя представлена на рис. 6.3. Делитель состоит из двух последовательно соединенных сопротивлений z_1 и z_2 , которые называют соответственно высоковольтным и низковольтным плечами делителя.

Если обозначить через U_1 высокое напряжение, прикладываемое к делителю, а через U_2 — напряжение, измеряемое прибором, то отношение

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{z_2}{z_1 + z_2}$$

называется коэффициентом деления делителя (z_2' — сопротивление, полученное в результате параллельного сложения сопротивления низковольтного плеча делителя и сопротивления измерительной цепи).

Делители напряжения бывают трех типов: омические, емкостные и смешанные. Применение того или иного типа делителя зависит от частоты измеряемого процесса.

Для осциллографирования процессов при электросепарации используются в основном омические делители напряжения. Такие делители позволяют определить и высокое напряжение по показаниям электростатического вольтметра, подключенного к низковольтному плечу делителя.

Омический делитель должен быть безындукционным и с минимальной паразитной емкостью относительно земли и окружающих предметов. Эти требования могут быть в известной степени выполнены при применении стандартных керамических или проволочных сопротивлений, включаемых последовательно.

Используются также проволочные сопротивления, изготовленные из манганина или константана. Тонкую проволоку диаметром 0,03—0,014 мм навивают безындукционно на изолирующую

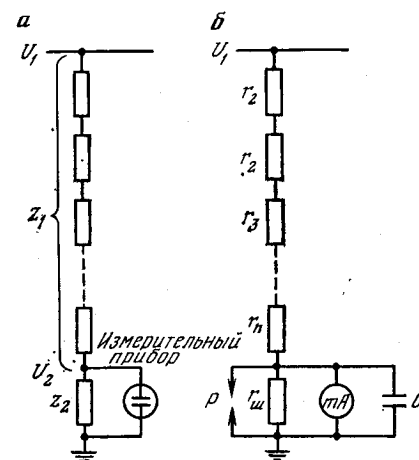


Рис. 6.3. Схемы подключения делителя (а) и добавочного сопротивления (б):

U_1 — высокое напряжение; U_2 — напряжение на измерительном приборе; z_1 и z_2 — сопротивления высоковольтного и низковольтного плечей делителя; r_1 — r_n — активные сопротивления; r_n — шунтирующее сопротивление; P — низковольтный разрядник

щие каркасы. Напряженность вдоль поверхности делителя во избежание поверхностного перекрытия должна быть ограничена величиной 3—5 кВ/см в воздухе и 15 кВ/см в трансформаторном масле.

Высокие постоянные напряжения удобно измерять с помощью магнитоэлектрических микроамперметров, включенных последовательно с высокоомными высоковольтными сопротивлениями (см. рис. 6.3, б). Ток, регистрируемый микроамперметром, пропорционален высокому напряжению на входе добавочных сопротивлений $r_1—r_n$, при этом пренебрегают падением напряжения на микроамперметре. В схеме может устанавливаться шунтирующее сопротивление $r_{ш}$, позволяющее уменьшить ток через микроамперметр. Защита микроамперметра от перенапряжений и бросков тока осуществляется с помощью разрядника P и конденсатора C . Например, при отсутствии шунтирующего сопротивления $r_{ш}$ микроамперметр со шкалой до 50 мкА, включенный через добавочное сопротивление $r_1—r_n=10^3$ МОм, позволит измерять постоянное напряжение до 50 кВ.

Добавочные сопротивления, так же как и делители напряжения, должны быть сконструированы так, чтобы предотвращать коронирование в измерительной цепи, так как в зависимости от интенсивности короны изменяется величина сопротивления.

Отметим, что при пульсирующем постоянном напряжении и применении прибора магнитоэлектрической системы в качестве микроамперметра измеряется среднее арифметическое значение.

Величина тока в высоковольтной цепи определяется обычно миллиамперметром, подключенным со стороны заземления схемы (см. рис. 6.2), что позволяет устанавливать прибор на пульте управления. Во избежание появления высокого напряжения на пульте в низковольтной части схемы при обрыве проводов миллиамперметра параллельно ему подсоединяется разрядник. Миллиамперметр может подключаться и в высоковольтную цепь, однако в этом случае он должен быть изолирован на максимальное рабочее напряжение и экранирован металлической сеткой, соединенной с корпусом.

Напряженности электрического поля в полях простейших конфигураций определяют расчетным путем (см. гл. 1). Непосредственно напряженности сильных электрических полей при сравнительно больших расстояниях между электродами измеряют с помощью зонда или методом пробного тела [2, 48].

В то же время методы экспериментального исследования электростатических полей не являются универсальными. Измерение напряженностей электрического поля наиболее сложно вблизи заряженных предметов. При приближении измерительного прибора электрическое поле искажается тем больше, чем ближе прибор располагают к заряженному объекту.

Методом пробного тела находят силы, действующие на металлический шарик в электрическом поле [2]. Сила определяется по отклонению в поле шарика, подвешенного на тонкой диэлектрической нити с высоким удельным сопротивлением, или по силе натяжения (весу) этой нити с шариком. По силе воздействия измеряемого поля на шарик, заряженный в фиксированной точке этого поля, рассчитывается заряд шарика и напряженность поля.

Поле короны постоянного тока исследуется с помощью зонда, на который от постороннего источника задается потенциал [2]. В процессе измерения этого потенциала изменяется ток на зонд и по значению величин потенциала и тока строится вольтамперная характеристика. Эта характеристика позволяет определить произведение подвижности ионов на их плотность и потенциал поля в исследуемой точке.

6.3. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ

Конструкция электродов наряду с величиной и формой высокого напряжения, подаваемого на эти электроды, является одним из важнейших факторов, определяющих процесс электросепарации.

В зависимости от радиуса кривизны высоковольтного электрода в рабочей зоне создается электрическое поле различной формы и степени неоднородности. Диаметр электрода (тонкий, толстый) может принципиально изменить процесс электросепарации и направление полета частиц, так как это связано с видом электрического поля — коронным или электростатическим.

Электростатические электроды изготавливаются в форме цилиндров и дуг различного радиуса, пластин. Поверхность электродов может быть металлической или выполняться из материала с высоким удельным сопротивлением.

Создание неоднородного электрического поля в барабанных сепараторах с электростатическим электродом, как показано в гл. 3, позволяет улучшить технологические показатели при сепарации непроводников. В работе [29] отмечалось, что применение электрического электрода очень малого диаметра способствует отклонению от барабана к электростатическому электроду частиц с высокой диэлектрической проницаемостью, а также хорошо проводящих частиц.

В работе [29] рассматривается конструкция, в которой увеличение неоднородности электрического поля достигается путем экранирования поля выше и ниже отклоняющего электрода заземленными пластинами. Таким путем сужается зона действия электростатического поля на сепарируемые частицы. Уменьшение времени действия электростатического поля может быть полезно при разделении как непроводящих, так и проводящих фракций от непроводящих.

В связи с тем, что электрод с малым радиусом кривизны приводит к возникновению короны, предлагается [29] проволоку помещать в стеклянную трубку. Стеклянная трубка делает электрическое поле резконеоднородным и в то же время препятствует возникновению коронного разряда. На рис. 6.4 приведена схема электросепаратора с пятью отклоняющими электродами такого типа, позволяющими многократно воздействовать на сепарируемый материал. Хорошо проводящие частицы и частицы с большой диэлектрической проницаемостью устремляются к отклоняющим электродам и проскакивают между ними. Осадительный электрод в сепараторе находится под вы-

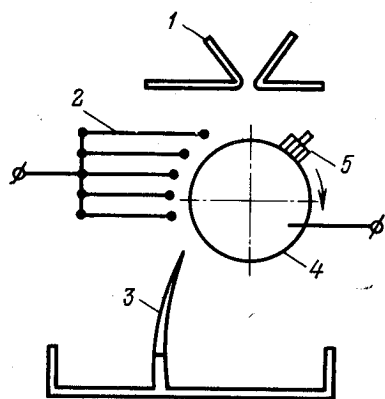


Рис. 6.4. Сепаратор с несколькими электродами, создающими неравномерное поле:

1 — бункер; 2 — электроды, создающие неравномерное поле; 3 — отсекающая трубка; 4 — осадительный электрод; 5 — щетка

соким потенциалом относительно земли, однако в настоящее время барабан обычно заземляют. Электроды малого диаметра, однако, не получили широкого распространения ввиду того, что они покрываются притягиваемой ими пылью и механически не прочны.

Известен положительный опыт использования в качестве отклоняющего электрода стеклянных газовых трубок, применяемых для освещения (лампа дневного света).

Полупроводниковое покрытие проводящего высоковольтного электрода в различных конструкциях позволяет увеличить разрядное напряжение между электродами, повысить степень неоднородности электрического поля,

уменьшить вероятность возникновения тока короны для электродов с небольшим радиусом кривизны.

Увеличение разрядного напряжения происходит при применении полупроводящего электрода, подсоединенного к отрицательному полюсу источника высокого напряжения. В таком электроде ток микрозаряда подавляется вследствие локального падения напряжения на объемном сопротивлении отрицательного электрода. Если разряд все же развивается, то заряд на электроде снимается с ограниченной области полупроводящего электрода, а напряжение на остальной площади электрода сохраняется. Имеется положительный опыт применения полупроводящих отрицательных электродов в специальных вакуумных электросепараторах для ядерных исследований (для сепарации К-мезонных пучков) [50]. Электрод покрывался подвергнутым особой термообработкой стеклом толщиной 120 мкм,

общее активное сопротивление электрода площадью 11 500 см² составляло $4 \cdot 10^4$ Ом.

При высоком сопротивлении покрытия электрода процесс электросепарации может нарушиться вследствие налипания на наружную поверхность электрода частиц (сепарируемых ионов) с противоположным знаком. Высокое сопротивление покрытия не позволяет нейтрализоваться заряду этих частиц и падение напряжения происходит на слое покрытия, а в пространстве вне электрода напряженность электрического поля резко уменьшается.

В некоторых конструкциях в качестве отклоняющего электрода используется вращающийся цилиндр, изготовленный из диэлектрика. В частности, в лабораторных сепараторах ПС-1 применяется бакелитовый цилиндр. Зарядка таких отклоняющих электродов осуществляется тонкой проволокой или игольчатыми коронирующими электродами, расположенными вдоль поверхности вращающегося диэлектрического электрода на стороне, удаленной от осадительного электрода (см. рис. 5.8). Диэлектрические отклоняющие электроды принимают потенциал проволоки или игл, но являются безопасными при прикосновении, так как через прикоснувшееся тело может пройти небольшой ток, определяемый объемным зарядом только в месте контакта. Несмотря на сравнительную сложность диэлектрического вращающегося электрода, он нашел распространение в обогатительной практике, что, вероятно, связано с хорошими технологическими результатами, полученными на сепараторах с такими электродами.

Исследования [13] показали, что потенциал поверхности диэлектрического вращающегося электрода лишь на 5 кВ меньше потенциала рядом размещенного коронирующего электрода, если последний имел потенциал 25—35 кВ. Потенциал диэлектрического электрода зависит от диаметра коронирующего электрода с 0,406 до 0,076 мм потенциал диэлектрического электрода увеличивается с 16 до 20 кВ. Напряженность поля в пространстве у электрода увеличивается при введении внутрь диэлектрического электрода заземленного металлического цилиндра.

В первых электрических сепараторах вращающиеся электроды, изготавливаемые из эбонита или стекла, заряжали с помощью трущегося приспособления. Однако потенциал электрода при такой зарядке в значительной степени зависит от влажности окружающей среды и загрязненности изоляторов.

Введение пластины с большим удельным сопротивлением между остроконечным высоковольтным и осадительным электродами приводит, помимо повышения электрической прочности воздушного промежутка, к увеличению неоднородности электрического поля. Такая конструкция отклоняющего электрода получила название усилителя отклонения и используется с начала

50-х годов для отделения алмазов крупностью до 3 мм на некоторых алмазообогатительных фабриках в Южной Африке [51].

Усилитель отклонения для алмазов устанавливается перед отклоняющим электродом (рис. 6.5) и выполняется из бакелитовых пластин сечением 25×25 мм. Сочетание двух материалов с большим удельным сопротивлением — бакелита и воздуха — приводит к тому, что напряженность и неоднородность поля

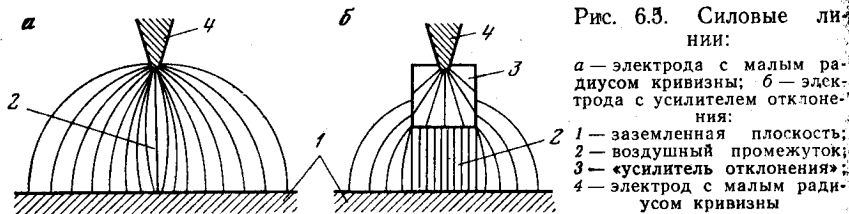


Рис. 6.5. Силовые линии:
а — электрода с малым радиусом кривизны; б — электрода с усилителем отклонения:
1 — заземленная плоскость; 2 — воздушный промежуток; 3 — «усилитель отклонения»; 4 — электрод с малым радиусом кривизны

dE/dx увеличиваются, что видно из рис. 6.5 по характеру и плотности силовых линий.

Алмазы в коронно-электрическом сепараторе при любой полярности и в сепараторе с усилителем отклонения (рис. 6.6) при положительной полярности налипают на барабаны, а лимонит, ильменит, магнетит отделяются. Установлено, что в сепараторе расширяется поток сепарируемых частиц и улучшаются показатели разделения.

При отрицательном заряде на усилителе отклонения и на отклоняющем электроде ставролит, турмалин и кварц, так же, как и при положительном заряде на электродах, налипают на барабан, однако алмазы отклоняются от барабана вместе с лимонитом, ильменитом. Это свойство алмазов нашло успешное применение на практике.

Коронирующие электроды в электросепараторах используются в основном игольчатые, проволочные и в виде лезвий. Возможна конструкция коронирующего электрода с поверхностью, выполненной в виде чередующихся

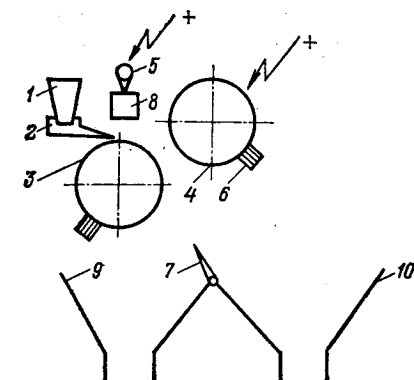


Рис. 6.6. Электросепаратор с усилителем отклонения:

1 — загрузочный бункер; 2 — вибрационный лоток; 3 — осадительный электрод; 4 — отклоняющий вращающийся электрод из диэлектрика; 5 — электрод с малым радиусом кривизны; 6 — щетка; 7 — разделительная перегородка; 8 — усилитель отклонения; 9 — приемник для концентрата; 10 — приемник для хвостов

участков из проводящего и непроводящего материалов; в таком электроде резко неравномерное поле имеет место на границе металл — диэлектрик [4].

Игольчатый коронирующий электрод сепаратора СЭС-1000М показан на рис. 6.7; в конструкции такого электрода используются швейные иглы.

В сепараторах ИГД в качестве коронирующих электродов применяется устройство из нескольких тонкостенных трубок диаметром 20 мм с врезанными в них лезвиями толщиной 0,1 мм, направленными в сторону барабана.

Коронирующий электрод барабанных сепараторов Карпко состоит из металлического цилиндра диаметром 24,5 мм, па-

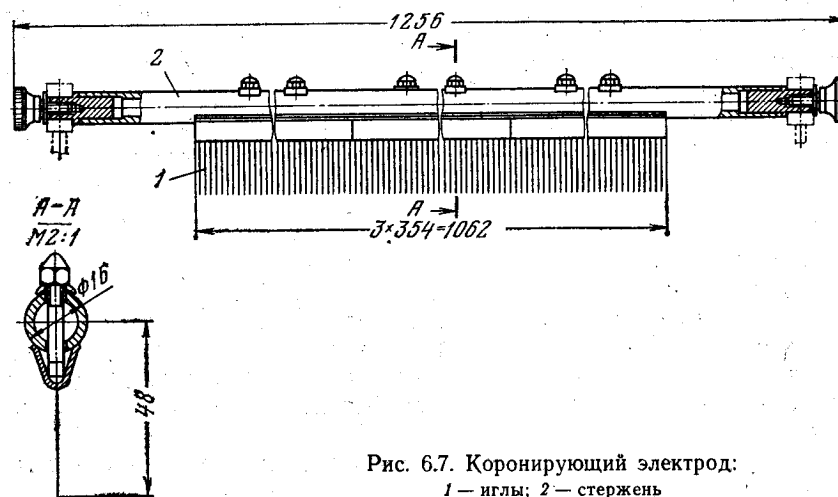


Рис. 6.7. Коронирующий электрод:
1 — иглы; 2 — стержень

раллельно которому на расстоянии 24,5 мм туго натянута проволока диаметром 0,25 мм или менее.

Размещение тонкой проволоки вблизи электрода большого диаметра, имеющей с ним электрический контакт, позволяет получить большой ток короны, который может быть сконцентрирован в узкой области. Цилиндр служит также механической опорой для проволоки.

Цилиндр может поворачиваться вокруг своей оси, что позволяет изменять положение проволоки относительно барабана и тем самым регулировать интенсивность потока газовых ионов из короны в сторону барабана. Поток ионов имеет максимальную интенсивность, если проволока обращена к барабану, и минимальную, если между барабаном и проволокой расположен цилиндр. Таким образом, одна и та же конструкция электрода позволяет создавать и коронирующее различной интенсивности, и электростатическое поля.

Величина потребляемого тока и диапазоны напряжений на различных отклоняющих электродах барабанных сепараторов следующие.

	Электро- статический цилиндриче- ский	Коронирую- щий проволочный	Коронирую- щий проволочный и электро- статический	Коронирую- щий проволочный (развернут относительно электростати- ческого)
Напряжение	0—20 кВ	0—30 кВ	0—50 кВ	0—30 кВ
Ток на 1 м длины элек- трода	13 мкА	10—65 000 мкА	0,7—1,6 мА	0,16—0,7 мА

Взаиморасположение отклоняющего электростатического и коронирующих электродов влияет на конфигурацию поля коронного разряда и тока короны во всех типах сепараторов. При приближении отклоняющего электрода к коронирующему ток короны и зона зарядки уменьшаются.

Частые пробой рабочего промежутка между высоковольтными и осадительными электродами нарушают технологический процесс. Когда в какой-либо точке между электродами проскакивает искра, то напряженность электрического поля во всем рабочем промежутке резко падает. От искры некоторые виды материалов могут взорваться или загореться. Поэтому в цепи питания высоковольтных электродов устанавливают высокоомные сопротивления, которые ограничивают величину тока искры и способствуют ее гашению. Монтаж электродов или участков электродов в виде отдельных групп, разделенных высокоомными сопротивлениями, приводит к уменьшению влияния искры на другие группы.

На рис. 6.8 показана конструкция коронирующего электрода, в котором каждая игла отделена от других высокоомным сопротивлением [29]. Электрод 1 сделан из оргстекла в виде трубки. Шина для подвода высокого напряжения 2 монтируется вдоль задней стенки трубки. Промежуток между иглами 3 и шиной заполняется жидкостью 4 с высоким сопротивлением, обеспечивающим ограничение тока искры до 300—1000 мА на 1 м длины электрода.

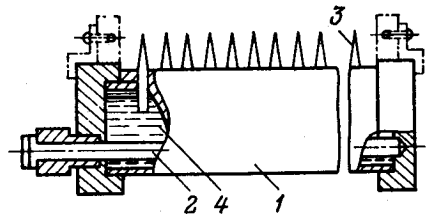


Рис. 6.8. Коронирующий электрод с ограничительным сопротивлением

В сепараторе, показанном на рис. 5.22, использованы коронирующие электроды в виде свободно подвешенных игл, колеблющихся относительно осадительного электрода и способствующих гашению тока полного пробоя коронирующего промежутка.

ГЛАВА 7 ПРАКТИКА ЭЛЕКТРОСЕПАРАЦИИ

7.1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОСЕПАРАЦИИ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Электрическая сепарация может быть как конечной технологической операцией, так и подготовительной для других обогатительных процессов (магнитных, пневматических).

Наибольшее число электросепараторов установлено для доводки грубых концентратов.

Для титано-циркониевой группы минералов и получения касситерита, граната, шеелита, ставролита, вольфрамит и некоторых других минералов электросепарация используется непосредственно за гравитационной и перед магнитной сепарациями.

Разделение минералов по электропроводности надежно осуществляется на барабанных коронных сепараторах. К минералам, имеющим большую электропроводность и поэтому легко сбрасываемым с осадительного электрода, относятся: антрацит, бисмутинит, брукит, вольфрамит, галенит, гематит, графит, гюбнерит, золото, ильменит, касситерит, колумбит, лейкоксен, лимонит, магнетит, марганит, пирит, пирохлор, платина, рутил, стибнит, сфалерит, танталит, тунгстит, хромит.

На осадительном электроде барабанных коронных сепараторов задерживаются минералы: алмаз, анортит, апатит, бадделит, берилл, барит, бастнезит, волластонит, гиперстен, гипс, гранат, диоксид, кальцит, карнолит, кварц, кианит, корунд, магнетит, монацит, полевые шпаты, роговая обманка, силлиманит, ставролит, топаз, турмалин, флюорит, целестин, циркон, шеелит, шпинель.

В отечественной и мировой практике барабанные коронные сепараторы используются для разделения следующих смесей: арсенинит — полевой шпат, асбест — силикаты, барит — силикаты, вольфрамит — пирит, графит — силикаты, железо — силикаты, золото — платиноиды — прибрежный песок, известняк — силикаты, ильменит — апатит, ильменит — гранат, ильменит — турмалин, ильменит — циркон, каолин — примеси железа, касситерит — монацит, касситерит — циркон, касситерит — шеелит, кианит — рутил и железо, колумбит — монацит, кобальт — серебро — силикаты, марганцевая руда — кремнезем, медная руда — силикаты, медно-никелевые руды — метасиликаты, молибденит — биотит, молибденит — силикаты, монацит — прибрежные пески, пирит — шеелит, пирохлор — апатит, пирохлор — сфен, полевой шпат — слюда, рутил — монацит, ру-

тил — прибрежные пески, рутил — циркон, силиконовый карбид — глинозем — силикаты, сподумен — касситерит, стибнит — силикаты, танталит — микролит, уголь — железо, уголь — сланец, флюорит — силикаты, хромит — гранат, хромит — ильменит — магнетит — монацит.

Производительность барабанных коронных сепараторов, например при обогащении железных руд крупностью менее 1 мм, достигает 2,5 т/ч на 1 м длины электрода. Из руды с содержанием железа около 50% получается концентрат, содержащий 60% железа и менее 2% SiO_2 , извлечение железа при этом составляет более 95%. Число перечисток выбирается одна-две при небольшой циркулирующей нагрузке (15—40%). Крупнейшие установки (США, Швеция) с производительностью каждого сепаратора до 40 т/ч перерабатывают до нескольких сотен тонн руды в час.

Непроводящие минералы с близкими значениями электрических проводимостей могут быть разделены в сепараторах с электростатическим полем после трибозарядки, которой в отдельных случаях предшествует реагентная обработка.

В электростатическом поле сепарируются минералы: апатит — кварц, асбест — серпентин, асбест — силикаты, барит — кварц, вермикулит — полевые шпаты, галит — сильвин, известняк — кварц, натриевый шпат — калиевый шпат, полевой шпат — кварц, фосфорит — кварц.

Производительность электростатических барабанных сепараторов не превышает 1,8 т/ч на 1 м длины электрода, а производительность одного сепаратора составляет 14 т/ч. При доводке титановых минералов (рутил и ильменит) извлечение TiO_2 составляет 98% при содержании в концентрате рутила и ильменита 99%. Число перечисток доходит до трех-четырех.

Одно из применений электросепарации — разделение частиц по форме и крупности. В этой области электросепарация используется для обеспыливания зернистых материалов, сухой классификации тонких частиц и отделения частиц различной формы. Электрическая классификация обычно применима, если материал состоит из одного вещества.

Механическая классификация с использованием проволочных сит имеет ряд недостатков, основные из которых — быстрое изнашивание проволочек и их забивание материалом. Для электрической классификации используются трибоадгезионные сепараторы [26], флюидизационно-электростатические классификаторы [48], камерные коронные сепараторы [1], камерные коронные сепараторы с осадительным электродом в виде сетки [52], барабанные электростатические сепараторы.

Барабанные электростатические сепараторы, применяемые для классификации, имеют осадительные электроды больших диаметров (до 450 мм), вращающиеся с окружной скоростью от 30 до 135 м/мин [29]. Для уменьшения скольжения частиц

поверхность барабанов выполняется шероховатой. Отклоняющие электроды небольшого диаметра (1,6—19 мм) располагаются на продолжении горизонтального радиуса барабана на расстоянии около 25 мм от его поверхности; напряжение, подаваемое на отклоняющие электроды, достигает 3,5 кВ.

Помимо разделения минерального сырья электросепараторы используются для сепарации сельскохозяйственных продуктов [41], отделения пластмасс от металлических примесей, классификации порошков для металлургии, регенерации формовочных земель и т. д.

7.2. СЕПАРАЦИЯ НЕМЕТАЛЛУРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Обогащение полевых шпатов

Государственные стандарты на материалы полевошпатовые и кварц-полевошпатовые (ГОСТы 7030—75, 13451—68, 15045—69) ограничивают в концентратах содержание кварца и устанавливают минимальное содержание суммы окислов щелочных металлов K_2O и Na_2O , а также и отношение содержания этих окислов. Для высококачественных полевошпатовых материалов ПШМ-0,20-2 и ПШМ-0,20-3 содержание свободного кварца не должно превышать 8% при содержании суммы K_2O и Na_2O не менее 11 и 12% при отношении содержания этих окислов соответственно 2 и 3. Кроме того, потребители предъявляют требования к постоянному составу материалов.

Больше всего содержится калия в разновидностях полевого шпата — микроклине и ортоклазе. Эти минералы представляют наибольшую ценность.

Чистый калиевый шпат встречается редко, обычно часть калия замещена натрием. В других полевых шпатах — плагиоклазе и альбите — содержание натрия превышает содержание калия.

При использовании пегматитов в качестве исходного сырья для получения высококачественных полевых шпатов требуется отделить часть кварца и разделить калиевые и натриевые полевые шпаты.

Наши исследования, а также зарубежный опыт показали целесообразность сепарации пегматитов ряда месторождений в барабанных сепараторах, работающих в электростатическом режиме [53].

После трибозарядки и температурной обработки кварц отклоняется к положительному электроду, в то время как калиевый полевой шпат — к отрицательному, натриевый же полевой шпат практически не отклоняется в электростатическом поле.

Для пегматитов Чупинского и Куру-Ваарского месторождений температура материала должна быть не ниже 120°С. Повышение температуры до 250°С существенно не влияет на се-

парацию. В лабораторных условиях нагрев пробы материала осуществляется в термостате, т. е. без контакта с продуктами сгорания топлива.

При проведении лабораторных исследований установлено, что для успешного осуществления процесса сепарации необходимо также нагрев барабана сепаратора. В промышленной эксплуатации температура элементов конструкции сепаратора устанавливается при непрерывном прохождении нагретого материала.

Трибозарядка при трении материала о материал позволяет достигать лучших технологических показателей, чем при скольжении материала по металлической заземленной поверхности. В лабораторном сепараторе трибозарядка частиц руды трением друг о друга обеспечивается установкой перемычки высотой 5 мм на вибропитателе сепаратора. Увеличение числа рядом размещенных перемычек приводит к некоторому ухудшению результатов сепарации, что может быть объяснено слабым перемешиванием материала, в результате чего часть частиц длительное время задерживается между перемычками. Эти частицы накапливают определенный заряд и нарушают процесс трибозарядки.

Эксперименты, проведенные на материале крупностью 0—1; 0,1—1; 0,25—1; 0,5—1 мм, показали, что узкая классификация материала перед электросепарацией и его глубокое обеспыливание не требуются. В сепарируемом материале класса 0—1 мм допускается содержание пыли крупностью менее 0,1 мм до 10%.

На рис. 7.1 приведена схема опытно-промышленной установки Гипронинметаллоруда. Электросепаратор СЭП-2 собран из пяти блоков и установлен в одной технологической линии с мельницей сухого самоизмельчения производительностью до 2 т/ч. По технологической схеме электросепарация проводилась после измельчения и предварительного нагрева руды в мельнице. Последующий нагрев материала осуществлялся в транспортирующем шнеке, установленном непосредственно перед электросепаратором, а также в самом сепараторе. Руда месторождения «Куру-Ваара» крупностью —250 мм измельчалась в мельнице до крупности —1,2 мм, а затем после подогрева в шнеке до температуры 150°С подавалась в сепаратор.

Технологические результаты свидетельствуют о возможности получения конечных продуктов широкой номенклатуры (табл. 7.1), они оказались не хуже результатов лабораторных опытов. Схема электросепаратора позволяет получать шесть продуктов обогащения, которые в дальнейшем, естественно, могут быть объединены в два-три продукта (табл. 7.2).

Из исходного сырья с содержанием кварца 32,7% и отношением $K_2O/Na_2O=1,9$ получено 14,7% полевого шпата для производства электроизоляторов и художественного фарфора

марки ПШМ-0,20-3 с содержанием кварца 5,6% при $K_2O/Na_2O=3,24$. Следует учитывать, что чистый микроклин данной пробы имеет отношение содержания окислов щелочных металлов 3,8. Возможно также получить 43% полевого шпата марки ПШМ-02-2 с содержанием кварца до 10% при $K_2O/Na_2O=2,27$. Режим электросепарации можно подобрать таким, чтобы не образовывались отвальные хвосты, а наряду с высококалорийными продуктами получалось более дешевое сырье для стекольной промышленности.

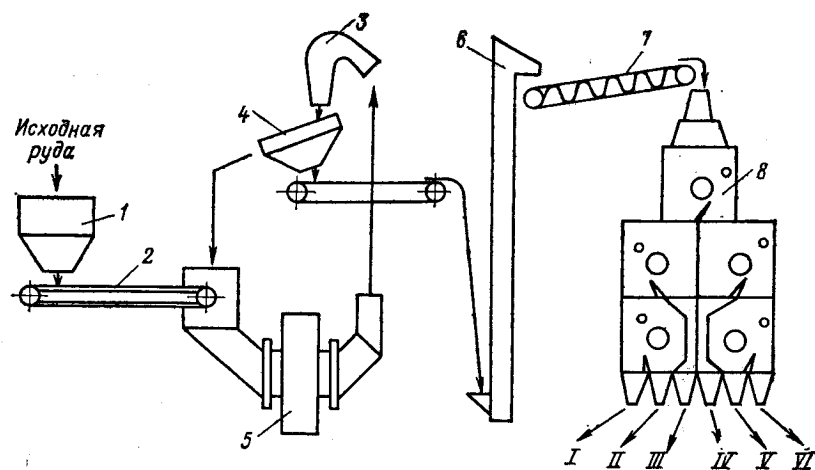


Рис. 7.1. Схема цепи аппаратов опытно-промышленной установки электрической сепарации полевошпатового сырья

1 — бункер; 2 — питатель; 3 — осадитель; 4 — грохот; 5 — мельница сухого самоизмельчения; 6 — элеватор; 7 — шнек; 8 — электросепаратор СЭП-2; I—VI — продукты сепарации

Результаты, приведенные в табл. 7.1 и 7.2, соответствуют схеме электросепаратора СЭП-2, когда основная сепарация и первая пересортировка всех продуктов осуществляются при отрицательной полярности отклоняющих электродов, а вторая пересортировка — при положительной полярности.

Разделение компонентов кварц-полевошпатового сырья возможно как при положительной, так и при отрицательной полярности отклоняющих электродов. В случае положительной полярности, например, кварц отклоняется от осадительного электрода, а в случае отрицательной, — наоборот. Однако при отрицательной полярности отклоняющих электродов можно поддерживать более высокую напряженность электрического поля (до 4 кВ/см), что улучшает показатели сепарации. В то же время применение разноименных полярностей в различных

Результаты сепарации пегматитов на электросепараторе СЭП-2

Продукт	№ точки	Выход, %	Содержание, %			K ₂ O/Na ₂ O	Содержание, % K ₂ O+Na ₂ O	Извлечение, %		
			кварца	K ₂ O	Na ₂ O			кварца	K ₂ O	Na ₂ O
I	13	5,7	2,5	9,88	2,88	3,44	12,76	0,4	9,2	5,4
II	14	1,4	6,6	9,25	3,19	2,90	12,44	0,3	2,1	1,5
III	12	3,8	4,1	10,00	3,25	3,07	13,25	0,5	6,3	4,1
IV	10	3,8	11,5	9,00	2,75	2,27	11,75	1,3	5,6	3,4
V	9	40,1	30,0	6,50	3,22	2,00	9,72	36,7	42,6	42,2
VI	11	45,2	44,0	4,63	2,94	1,57	7,57	60,8	34,2	43,4
Исходный	—	100,0	32,7	6,11	3,06	1,99	9,17	100,0	100,0	100,0
I	13	5,6	12,8	9,46	3,10	3,04	12,56	2,2	9,0	5,4
II	14	13,8	4,0	7,19	3,28	2,19	10,47	1,7	16,8	14,1
III	12	26,6	12,7	7,96	3,68	2,16	11,64	9,2	31,7	57,1
IV	10	3,1	43,1	5,44	2,50	2,18	7,94	4,1	3,9	2,5
V	9	15,4	42,2	5,00	3,25	1,54	8,25	19,9	13,0	15,6
VI	11	38,5	53,2	4,08	2,93	1,39	7,01	62,9	26,6	35,3
Исходный	—	100,0	32,6	5,91	3,20	1,85	9,11	100,0	100,0	100,0
I	13	19,8	8,0	9,34	3,1	3,01	12,44	5,9	32,1	20,2
II	14	4,7	7,9	7,75	3,38	2,29	11,13	5,9	6,3	5,2
III	10	16,9	26,2	5,90	3,39	1,74	9,29	16,7	17,3	18,8
IV	12	11,4	31,4	5,00	3,09	1,62	8,09	13,5	9,9	11,6
V	9	23,0	32,1	4,3	3,0	1,43	7,0	27,8	17,2	22,7
VI	11	24,2	33,2	4,1	2,7	1,52	6,8	30,2	17,2	21,5
Исходный	—	100,0	26,6	5,76	3,04	1,89	8,8	100,0	100,0	100,0

Примерная номенклатура марок продукции, полученной после электросепарации на СЭП-2

Марка продукта	Выход, %	Содержание, %			K ₂ O/Na ₂ O	Содержание, % K ₂ O+Na ₂ O	Извлечение, %		
		кварца	K ₂ O	Na ₂ O			кварца	K ₂ O	Na ₂ O
ПШМ-0,20-3	14,7	5,6	9,62	2,97	3,24	12,59	2,5	23,2	14,4
КПШМ-0,20-2	40,1	30,0	6,50	3,22	2,00	9,72	36,7	42,6	42,2
КПС-1	45,2	44,0	4,63	2,94	1,57	7,57	60,8	34,2	43,4
Исходный	100,0	32,7	6,11	3,06	1,90	9,17	100,0	100,0	100,0
ПШМ-0,20-2	43,0	9,9	7,90	3,47	2,27	11,37	13,1	57,5	46,6
КПС-1	57,0	49,7	4,40	2,99	1,47	7,39	86,9	42,5	53,4
Исходный	100,0	32,6	5,91	3,20	1,85	9,11	100,0	100,0	100,0
ПШМ-0,20-3	19,8	8,0	9,34	3,1	3,01	12,44	5,9	32,1	20,2
ПШМ-0,20-2	4,7	7,9	7,75	3,38	2,29	11,13	5,9	6,3	5,2
КПШМ-0,20-2	70,5	35,0	5,03	3,22	1,56	8,25	92,71	61,6	74,6
Исходный	100,0	26,6	5,76	3,04	1,89	8,8	100,0	100,0	100,0

облаках позволяет наиболее полно использовать центробежные и электрические силы. Поэтому в течку V попадают (см. рис. 7.1) крупные частички микроклина, в течку II — мелкие.

Проверялась работа электросепаратора СЭП-2 со встроенными вибропитателями в каждом блоке и с самотечными питателями. В связи с тем, что при пересыпке из блока в блок материал получает достаточные трибозаряды, установка самотечных питателей практически не изменила показателей сепарации и в то же время значительно упростила обслуживание и конструкцию оборудования.

Влияние реагентной обработки материала на сепарацию исследовалось при использовании полупромышленного сепаратора КС-4, который также устанавливался после мельницы сухого самоизмельчения. Барабанный электросепаратор КС-4 имеет два каскада с осадительными электродами длиной 400 мм и диаметром 300 мм. Химический реагент — порошок салициловой кислоты — засыпался в мельницу вместе с исходным питанием. Применение салициловой кислоты приводило к значительному снижению содержания Na_2O в концентрате, при этом, в отличие от опытов без обработки кислотой, содержание кварца снижалось незначительно (табл. 7.3). Таким образом, в данном случае влияние реагентной обработки на технологический процесс отлично от влияния одной лишь термической подготовки.

Как уже указывалось, в результате лабораторных опытов было установлено, что для выделения кварца из пегматитов Чупинского месторождения необходим нагрев материала до 120°C . Однако испытания на электросепараторе СЭП-1, установленном непосредственно в технологической линии Чупинской пегматито-обогащительной фабрики, показали, что сепарация может проходить и при меньших температурах.

Осуществлялся только нагрев сепаратора СЭП-1 с помощью встроенных элементов сопротивления. В сепараторе были смонтированы электростатические отклоняющие электроды.

После электросепарации из продукта, содержащего 25% свободного кварца, получено 51% продукта с 10% кварца. Температура материала на выходе составляла 50°C .

Удовлетворительные технологические показатели при сравнительно низкой температуре объясняются тем, что в промышленных условиях материал поступает на электросепарацию непосредственно после дробления и поверхность частичек не успевает адсорбировать влагу и покрыться пылью.

Условия подготовки материала и показатели сепарации зависят от условий образования, например, пегматиты месторождения «Отрадное» требуют несколько иной подготовки, чем пегматиты месторождений «Куру-Ваара» и «Чупинского», а именно измельчение до крупности менее 0,5 мм и нагрев до $+400^\circ\text{C}$. Показатели электросепарации по месторождению «Отрадное»,

Таблица 7.3

Результаты сепарации при реагентной обработке

Продукт	Выход, %	Содержание, %			$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	Содержание, % $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	Извлечение, %		
		кварца	K_2O	Na_2O			кварца	K_2O	Na_2O
Концентрат	21,6	22,3	5,3	1,87	2,83	7,17	16,7	25,7	11,5
Промпродукт	62,8	18,9	4,7	4,25	1,10	8,95	41,0	66,5	76,2
Хвосты	15,6	78,6	2,2	2,77	0,79	4,97	42,3	7,8	12,3
Исходный	100,0	28,9	4,44	3,5	1,27	7,94	100,0	100,0	100,0

Таблица 7.4

Результаты электросепарации пегматитов месторождения «Отрадное»

Продукт	Выход, %	Содержание, %			$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	Содержание, % $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	Извлечение, %		
		кварца	K_2O	Na_2O			кварца	K_2O	Na_2O
Концентрат	34,9	21,1	7,29	3,39	2,15	10,68	17,6	59,0	35,2
Промпродукт	65,1	52,8	2,71	3,35	0,81	6,06	82,4	41,0	64,8
Исходный	100,0	41,7	4,31	3,36	1,28	7,67	100,0	100,0	100,0
Концентрат	21,6	5,4	10,00	3,10	3,20	13,1	3,1	47,9	19,6
Промпродукт	78,4	46,6	3,0	3,51	0,85	6,51	96,9	52,1	80,4
Исходный	100,0	37,7	4,51	3,42	1,32	7,93	100,0	100,0	100,0

полученные на лабораторном сепараторе ПС-1, приведены в табл. 7.4.

В сырье для полевошпатового производства — пегматите содержится до 3—10% слюды (биотита и мусковита), которая не полностью извлекается при магнитной сепарации.

Пневматические системы позволяют снизить содержание слюды только при значительных потерях полевошпатового сырья. Для полевошпатового сырья изготовлен электросепаратор СЭП-1, позволяющий снижать содержание слюды в промежуточном продукте (питании магнитных сепараторов) при сравнительно низких потерях в материале, измельченном до —1 мм.

В соответствии с ГОСТ 7030—75 содержание слюды в дробленом материале ограничено двумя частичками на 100 зерен полевого шпата и кварца в классах крупности 0,63—0,8 и 0,5—0,63 мм. При числе слюдинок в исходном питании 10—29 штук на 100 зерен полевого шпата и кварца число слюдинок в концентрате после электросепарации снижается в 3—5 раз, выход слюдяного продукта составляет 4,5%. Одновременно содержание Fe_2O_3 в концентрате уменьшается до 0,19% при содержании 0,24% в питании электросепарации.

Электрическая сепарация полевого шпата осуществляется рядом зарубежных фирм. Например, фирма «Луржи» (ФРГ) построила по крайней мере две фабрики с электрической сепарацией полевого шпата, а фирма «Карпко» (США) установила сепараторы для обогащения полевого шпата на обогатительных фабриках в США, Канаде и др.

По данным американской практики, стоимость керамического полевошпатового концентрата, полученного методом электрической сепарации, в 1,5—2 раза дешевле выделяемого флотационным методом [53].

Первые фабрики, на которых проводилась сепарация полевого шпата, построены в Кине (США, Нью-Хэмпшир) и Кейн Фелдшпа (Канада, Квебек). Технологическая схема переработки сырья на фабрике в Кине показана на рис. 7.2. В работе [54] указывается, что для электросепарации важен способ измельчения и вид используемого оборудования. Рекомендуется применять мельницы или валковые дробилки, при измельчении в которых получают большее количество частиц неправильной формы. Такая форма частиц является предпочтительной по сравнению со сферической, так как у частиц неправильной формы больше отношение площади поверхности к массе и больше заряд на единицу массы.

В пегматите обычно содержится значительное количество мусковита, биотита, турмалина, граната и некоторых других железосодержащих минералов, которые необходимо извлекать перед электросепарацией, так как они могут явиться причиной дугового разряда в электростатическом поле [54]. На фабриках в Кине и Кейн Фелдшпа после конусных дробилок вторичного

дробления для отсева крупных фракций слюды большой толщины установлены грохоты.

Начиная с этого участка для улавливания более тонких чешуек применяются вентиляционные системы или системы пневматического отсоса. Чтобы удалить биотит, турмалин, гранат и другие железосодержащие минералы, исходный материал про-

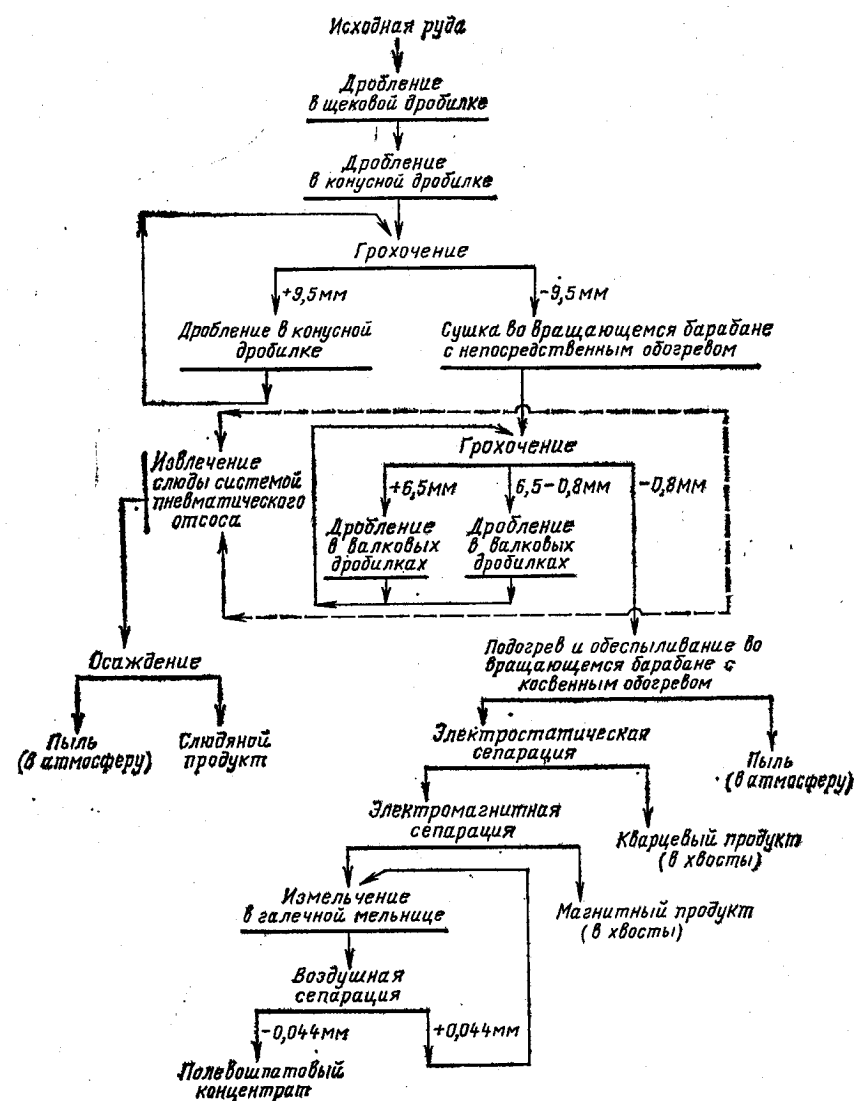


Рис. 7.2. Технологическая схема электростатической сепарации полевого шпата

пускают через магнитные поля высокой интенсивности, причем интенсивность полей последовательно возрастает.

В исходном материале должно содержаться по возможности меньше пыли и мелочи. Пыль и мелочь препятствуют свободному прохождению материала и являются причиной неэффективной сепарации (магнитной или электрической).

На фабрике в Кине аппараты системы пневмоотсоса установлены на нескольких участках технологических линий, в отвал направляется весь материал крупностью — 0,074 мм. В ходе пневмоотсоса осуществляется и очистка расщепленных кристаллов. Перед электростатической сепарацией исходный материал нагревается до 130°С и одновременно перемешивается. На основании опыта работы фабрики в Кине пришли к выводу, что наиболее выгодной является барабанная сушилка с косвенным обогревом.

Электросепарация проводится на барабанных сепараторах с электростатическим отклоняющим электродом, на который подается положительный потенциал в 15—25 кВ. Производительность фабрики в Кине достигала 80 т в сутки. Данные химических анализов по этой фабрике приведены в табл. 7.5.

Таблица 7.5

Результаты разделения пегматитов

Компоненты	Содержание, %		Хвосты	Компоненты	Содержание, %		Хвосты
	Исходное питание	Полевошпатовый концентрат			Исходное питание	Полевошпатовый концентрат	
SiO ₂	74,28	69,40	78,08	Na ₂ O	3,00	3,60	2,75
Al ₂ O ₃	15,40	16,08	12,86	CaO	0,20	0,265	0,205
Fe ₂ O ₃	0,365	0,07	0,354	П. п. п.	0,54	0,46	0,60
K ₂ O	6,20	9,30	3,72				
				Итого	99,985	99,175	99,569

Выход продуктов следующий: полевошпатовый концентрат 45,4%, хвосты (кварц и силикаты) 38,4%, попутно получаемый слюдяной продукт 1,9%.

На фабрике «Топсхэм» (США) проведены успешные промышленные испытания по разделению полевых шпатов в электросепараторах свободного падения [54]. Трибозарядка материала осуществлялась при его движении по вибrolотку, выполненному из графита, алюминия или цинка. Кварц приобретал максимальный отрицательный заряд при 90—150°С.

На обогатительных фабриках в ФРГ нашло применение электростатическое обогащение с предварительной реагентной обработкой [53]. На фабрике фирмы «Амберггер каолинверкс» исходный материал подвергали воздействию в обогреваемом вращающемся реакторе парами фтористого водорода.

Обогащение вермикулита

Вермикулит — это слюдоподобный магнезиально-железистый алюмосиликат непостоянного химического состава. При нагревании докрасна обезвоженный материал обнаруживает характерное свойство для всех вермикулитов — резкое увеличение в объеме. Вспученный вермикулит используется в строительстве, машиностроении, металлургии, для теплоизоляции, а также в качестве инертного наполнителя.

Электросепарация невспученного вермикулита осуществляется для частиц крупностью менее 2—3 мм и для невспученного вермикулита крупностью менее 10 мм.

В зависимости от минерального состава исходной руды и содержания в ней вермикулита на фабриках применяются различные схемы обогащения, где электросепараторы устанавливаются для:

доводки некондиционных гравитационных концентратов до требований технических условий (содержание вермикулита 85%);

получения высокосортных вермикулитовых концентратов с содержанием вермикулита свыше 90% из кондиционных вермикулитовых концентратов;

обогащения исходной руды с повышенным содержанием (более 40%) вермикулита;

отделения вспученного вермикулита от пустой породы после нагрева.

Доводка гравитационных концентратов и получение высокосортного вермикулита представляют большой интерес для Ковдорской вермикулитовой фабрики, где после гравитации в водной среде продукт содержит повышенное количество легких минералов (кальцит, ийолит и др.), близких по плотности к

Таблица 7.6

Результаты доводки черного концентрата столов на электросепараторе

Продукт	Выход, %	Содержание, %	Извлечение, %
Концентрат	58,4	89,6	94,1
Хвосты	41,6	8,0	5,9
Исходный	100,0	55,7	100,0
Концентрат	55,8	96,1	92,8
Хвосты	44,2	9,4	7,2
Исходный	100,0	57,8	100,0

вермикулиту. Получение высокосортных концентратов применяющихся на Ковдорской фабрике гравитационными методами связано с большими потерями вермикулита (снижением извлечения).

Подготовительными операциями перед электрической сепарацией вермикулита являются классификация материала, обеспыливание по классу — 0,1 мм и термическая обработка до 100—150° С.

Доводка гравитационных концентратов на барабанном электросепараторе с электростатическим полем позволяет добиться довольно высоких технологических показателей (табл. 7.6), но требует помимо основной сепарации три-четыре контрольные операции. Результаты, приведенные в табл. 7.6, даны для материала крупностью 1—2 мм и получены на электростатическом сепараторе с диаметром барабана 150 мм при частоте вращения барабана 70 об/мин.

На Потанинской вермикулитовой фабрике намечено установить электросепараторы для обогащения исходной руды мелких классов.

На месторождении отмечается непрерывный ряд слюдястых минералов: вермикулит — гидробиотит — биотит. Содержание

Таблица 7.7
Результаты электросепарации вермикулитовой руды в зависимости от крупности питания

Крупность материала, мм	Продукт	Выход, %	Содержание, %	Извлечение, %
0,6—1,2	Концентрат	56,9	93,8	95,8
	Хвосты	43,1	5,4	4,2
	Исходный	100,0	55,7	100,0
1,2—2,5	Концентрат	64,1	85,1	87,4
	Хвосты	35,9	22,0	12,6
	Исходный	100,0	62,4	100,0
0,1—2,0	Концентрат	59,3	83,4	86,4
	Хвосты	40,7	19,2	13,6
	Исходный	100,0	57,2	100,0

гидратированных слюд составляет в среднем 30%. Пустая порода представлена полевым шпатом, цеолитом, кальцитом, сфеном.

Эксперименты проводились на барабанных сепараторах при чередующейся полярности коронирующих электродов. Из данных табл. 7.7 видно, что при сепарации вермикулитовой руды разной крупности получаются хорошие результаты, однако лучшие технологические показатели обогащения достигнуты при обогащении класса 0,6—1,2 мм.

Исследование влияния порядка чередования полярности на результаты сепарации показало, что изменение полярности электродов с отрицательной на положительную и наоборот не влияет на технологические показатели. При электросепарации вермикулита большое значение имеют температура материала, частота вращения осадительного электрода, производительность сепаратора, конструкция и размещение высоковольтного электрода.

В США известен положительный опыт использования барабанных коронных сепараторов для отделения вермикулита крупностью 0—3,3 мм от оливина, серпентина, нефелина, биотита. Из исходной руды месторождения «Либби» с содержанием вермикулита 32% получен 96,5%-ный вермикулитовый концентрат при извлечении вермикулита 92,4% [56].

Температура сепарации составляла 120° С. На верхнем барабане сепаратора в поле коронного разряда осуществлялась классификация материала на два класса: 0,6—3,3 мм и менее 0,6 мм. Классифицированный материал (промпродукт) разделялся в электростатическом поле положительной полярности (4 операции), а затем — отрицательной полярности (3 операции).

Электросепарация калийных руд

Комплекс исследований по сепарации калийных руд Верхнекамского, Стебниковского и других месторождений проведен в Институте галургии.

Разработаны режимы отделения сильвина (KCl) от галита (NaCl) как при термической подготовке руды перед электросепарацией, так и с использованием реагентной обработки при сравнительно невысокой температуре [33].

Калийная руда Верхнекамского месторождения дробилась до крупности 0—2 мм и рассеивалась на два класса 0,5—2 и 0—0,5 мм. При термической подготовке сильвинитов осуществлялся нагрев до 450—500° С, затем руда охлаждалась до температуры 120—130° С и подавалась в электростатический сепаратор. Кондиционный концентрат с содержанием 92% KCl получен после трех перечисток; суммарное извлечение составило 80—82%.

Предварительная обработка сильвинита и галита ароматическими кислотами (салициловой и бензосульфокислотой) приводит к гидрофобизации их поверхности. Сорбция влаги на поверхности резко снижается, уменьшается поверхностная влажность минералов, что способствует селективной электризации при контакте.

Наилучшие результаты сепарации в полупромышленных условиях на рядовой руде Верхнекамского месторождения получены при температуре материала 80—130°С и расходе реагента 100—150 г на 1 т руды. Использовались бензолсульфокислота и аммиак, имеющие низкую стоимость. Реагентная обработка осуществлялась в реакторе кипящего слоя. Производительность установки при трех перемешиваниях составила 1,5 т на 1 м длины осадительного электрода барабанного электростатического сепаратора. Концентрат содержал 94—96% KCl при извлечении 85—90% KCl.

Одно из условий успешного обогащения сильвинитовой руды является ее обесшламливание, при этом содержание глинистых шламов (нерастворимого осадка) не должно превышать 4%. Обесшламливание осуществлялось на барабанных коронных сепараторах СЭС-1000. Эту операцию на электросепараторах рекомендуется применять также и перед флотационным разделением минералов, в частности для руд Стебниковского месторождения [33].

Метод обогащения калийных руд, использовавшийся в начале 50-х годов на одном из промышленных предприятий в США (Карлсбад), предусматривал трибозлектрическую зарядку при температурной обработке в пределах 300—700°С, за которой следовала сепарация материала, охлажденного до 100—200°С.

В калийной промышленности ФРГ в настоящее время получила развитие предварительная реагентная обработка и трибозарядка при определенной влажности воздуха, что позволило осуществлять нагрев руды до температуры ниже 100°С и использовать высокопроизводительные камерные электростатические сепараторы. Таким образом, разделяются руды «хальтзальц» на сильвин, кизерит ($MgSO_4 \cdot H_2O$) и каменную соль [44].

В качестве реагентов, добавляемых к измельченной каменной соли, используются алифатические и ароматические монокарбоновые кислоты, аммониевые соли алифатических монокарбоновых кислот или замещенных монокарбоновых кислот. После обработки реагентами руда направляется в нагревательный аппарат, где поддерживается относительная влажность воздуха от 5 до 15% и происходит селективная трибозарядка сырья. Величина относительной влажности регулируется температурой воздуха и определяется в зависимости от того, какие компоненты необходимо разделить.

Сильвин заряжается в большинстве случаев положительно, а каменная соль и кизерит приобретают положительный либо отрицательный заряд в зависимости от используемого реагента при предварительной обработке и относительной влажности воздуха. Сильвин может быть заряжен положительно относительно каменной соли и кизерита либо вместе с каменной солью заряжен положительно относительно кизерита, или вместе с кизеритом иметь положительный заряд относительно каменной соли.

Схема обогащения предусматривает перемешивание черного концентрата, повторное измельчение промпродукта и возврат его в цикл электросепарации.

Обогащение фосфатных руд

В электростатическом поле разделяются ракушечные, песчаные и галечные фосфориты, в которых фосфат необходимо отделять от кварца, кальцита, доломита и глауконита.

В схеме обогащения ракушечных фосфоритов месторождения Маарду предусматриваются измельчение руды до крупности —3 мм и далее грохочение на сите 0,8 мм [28]. В классе +0,8 мм содержится более 26% P_2O_5 , поэтому он выделяется как готовый продукт. Руда класса —0,8 мм нагревается до температуры 140°С, затем охлаждается до 100°С и направляется в камерный электростатический сепаратор свободного падения конструкции ГИГХСа, где осуществляется перемешивание двух продуктов. Концентрат электросепарации объединяется с продуктом крупностью +0,8 мм. Объединенный концентрат содержал 26—28,7% P_2O_5 при извлечении 87—93,4% от исходной руды, в которой содержание P_2O_5 составляло 9,6—12,9%. Средняя производительность по исходному питанию достигала 1,2 т/ч на 1 м длины электродов камерных сепараторов.

На комбинате «Фосфорит», на котором перерабатываются руды Кингисеппского месторождения, построена опытно-промышленная установка с камерными электростатическими сепараторами свободного падения производительностью до 4 т/ч для электросепарации флотационного концентрата [28].

Наличие на поверхности частиц флотореагентов позволяет ограничиться температурой 60—100°С, при которой продукт выходит из сушильного барабана.

Материал подвергался двум стадиям электросепарации при напряженности электрического поля 2,5 кВ/см. Из продукта с содержанием 28% P_2O_5 получен высококачественный концентрат с содержанием 32—33% P_2O_5 при извлечении около 70%.

На обогатительной фабрике в США (штат Флорида) установлено несколько электросепараторов для доводки флотационных концентратов галечных фосфоритов [13, 28]. Материал до сушки в барабанных сушилках обрабатывался флотацион-

ными реагентами типа жирных кислот. Электросепарация осуществлялась в электростатическом поле на барабанных сепараторах. Комбинированная флотационная и электрическая схема обогащения позволяла получать фосфатный концентрат с содержанием 37% P_2O_5 при извлечении 90%.

Доводка алмазных концентратов

Алмазы при электросепарации ведут себя как непроводники, помимо этого они смачиваются водой хуже, чем многие минералы, поэтому их удается отделить даже от кварца, имеющего большое сопротивление.

На доводку алмазы поступают после отсадки, обработки в тяжелых жидкостях, магнитной сепарации и сепарации на ленте, покрытой жиром. При сепарации по плотности алмазы выделяются вместе с другими тяжелыми минералами, а при жировом процессе прилипают к ленте вместе с частицами, легче смачиваемыми жиром, чем водой.

Очистка алмазов от органических пленок, глины, графита, кимберлитовой породы, веществ, образовавшихся при выветривании сопутствующих минералов, осуществляется с помощью оттирки в шаровой мельнице с небольшой загрузкой шаров малого диаметра. Слой жира после жирового процесса удаляется в значительной степени промывкой горячей водой или раствором каустической соды, остатки этого слоя удаляются после промывки хромовой смесью.

Технологические показатели электросепарации алмазов, извлекаемых, в частности, из гравия, улучшаются в случае предварительной обработки раствором поваренной соли. Пленки, образовавшиеся после такой обработки алмазов и пустой породы, увеличивают проводимость только частиц пустой породы. Степень сокращения алмазов при электросепарации увеличивалась с 10 раз для необработанной руды до 623 раз после обработки 1,1%-ным раствором поваренной соли [13]. Однако при такой концентрации раствора показатели сепарации были неустойчивые, поэтому было решено остановиться на 0,5%-ном растворе NaCl, в результате обработки которым степень сокращения составила 154 раза.

На одной из обогатительных фабрик, расположенной во влажной местности вблизи Атлантического побережья юго-западной Африки, исследовалось влияние влажности на электросепарацию алмазов. Рабочие пределы относительной влажности воздуха составляли 54—65%, так как в случае повышения влажности от низкой до 66—70% показатели сепарации улучшались, однако при дальнейшем увеличении влажности алмазы в барабанном коронно-электростатическом сепараторе начинали вести себя как проводники и отталкивались от осадительного электрода [29].

Регулирование влажности внутри сепаратора в осадительных конструкциях осуществляется с помощью нагревательных элементов, вмонтированных в вибрационный питатель. Мощность нагревательных элементов изменяется в зависимости от влажности в сепараторе.

Электросепарация при доводке алмазных концентратов в СССР впервые применена в 1950 г. на прииске «Уралалмаз» [30]. Схема, осуществленная на ряде фабрик и драгах, предусматривала отсадку, магнитную сепарацию, сушку, электрическую сепарацию и рентгенолюминесцентный отбор. Электросепарации на барабанных коронных сепараторах подвергалась немагнитная фракция, предварительно классифицированная на классы 2—4, 1—2 и 0,5—1 мм. Извлечение в крупных классах достигало 97,7%, а в мелких — 99,7%. Степень сокращения после одной операции для материала крупностью 2—4 мм составляла 6 раз, а крупностью 2—4 мм доходила до 240 раз.

Концентрат тяжелых минералов, полученный из намывных песков юго-западной Африки, с начала 50-х годов успешно перерабатывался на барабанных электростатических сепараторах с диэлектрическим вращающимся отклоняющим электродом [51]. Материал крупностью менее 6 мм перед электросепарацией подвергался оттирке на барабанной мельнице, очищался от шлама на вибрационном грохоте, промывался и подсушивался во вращающейся печи, работающей на нефти, и при температуре 130°С и направлялся на барабанные электросепараторы. В схеме было четыре барабанных электросепаратора, работавших параллельно. Каждый из сепараторов позволял осуществлять шесть стадий сепарации; перемешиванию подвергался содержащий алмазы продукт, который удерживался на барабане, а хвосты (гравий), отклонившиеся от барабана, с каждой ступени направлялись в отвал. Концентрат в дальнейшем сортировался вручную. На отклоняющий электрод подавалось рабочее напряжение до 22 кВ положительной полярности. Длина рабочих электродов равнялась 152 см, а ширина питания 120 см. Производительность одного сепаратора на материале крупностью 1,9—6 мм составляла 0,5 т/ч, извлечение алмазов превышало 99%, а степень сокращения материала 200 раз.

При сепарации алмазов некоторых месторождений успешно используется «усилитель отклонения» (см. п. 6.3).

Электросепарация также используется для извлечения алмазов из стружки, образовавшейся в результате резания твердых материалов [1].

7.3. СЕПАРАЦИЯ РУД ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ

В случае недостаточного содержания железа в концентратах магнитного и гравитационного обогащения на некоторых фаб-

риках производят доводку концентратов электрической сепарацией.

Перечистка высушенного черного концентрата, полученного из гематитовых руд, осуществляется на канадской фабрике в Убуш Лэйк. Ранее эту руду подвергали автогенному размолу, за которым следовали три стадии мокрой гравитационной концентрации на винтовых сепараторах. Концентрат, полученный таким образом, содержал примерно 65% железа при извлечении порядка 70%.

После установки электрических сепараторов фирмы «Карпко» содержание железа повысилось до 68% при извлечении на операции электрической сепарации 97%.

На фабрике установлено 58 коронных барабанных сепараторов, из которых 36 шестибарабанных предназначены для перечистки промпродукта и хвостов. Барабаны электросепараторов имеют диаметр 356 мм и длину 3050 мм, у каждого барабана смонтированы по два коронирующих электрода из вольфрамовой проволоки диаметром 0,25 мм. При выборе параметров электросепарации установлено, что результаты обогащения в значительной степени зависят от места размещения коронирующих электродов — оптимальное положение этих электродов у верхней части барабана [57].

Производительность всего отделения электросепараторов достигает 1000 т/ч при удельной нагрузке на 1 м длины барабана 1,25—1,6 т/ч.

Электросепараторы фирмы «Луржи» используются в Южной Африке для обогащения гематитовой железной руды крупностью менее 0,5 мм. Электросепараторы были включены в ранее существующую схему мокрого обогащения, при которой мелкие классы не улавливались и уходили в хвосты.

Материал после сухого измельчения в мельнице «Аэрофол» классифицируют по классу — 0,5 мм. Продукт крупностью +0,5 мм обогащают на винтовых сепараторах, а крупностью 0—0,5 мм — на магнитных сепараторах с сильным полем. На электрические сепараторы поступает магнитный продукт, отделенный магнитными сепараторами [58]. Материал перед электросепарацией нагревают до 130°С в печи кипящего слоя. Электросепараторы снабжены коронирующим электродом и имеют два барабана диаметром 300 мм и длиной 1,5 м.

Установка электросепараторов после магнитных сепараторов вызвана тем, что в кварце имеются тончайшие включения гематита и значительное количество силикатов железа, такие как слюда, роговая обманка, гранат. Указанные примеси имеют близкие магнитные свойства с гематитом и попадают в магнитный концентрат. Лишь используя различия в электрической проводимости с помощью электросепараторов удается отделить нежелательные примеси и добиться содержания 69% Fe в концентрате.

В Швеции (вблизи Мальбергета) с 1975 г. работает обогатительная фабрика, на которой из гематитовой руды, содержащей 50% железа и 0,6% фосфора, получают концентрат с 67—68% железа и 0,08% фосфора. Производительность фабрики 1 млн. т руды в год [59].

По сравнению с магнитной сепарацией метод обогащения на барабанных коронных сепараторах приводит к более простой схеме цепи аппаратов и значительно меньшему потреблению электроэнергии. Различные железосодержащие минералы, такие как магнетит, гематит, имеют почти одинаковую электрическую проводимость и на электрических сепараторах концентрируются вместе. Вследствие различной магнитной проницаемости этих минералов магнитная сепарация должна осуществляться в несколько ступеней в слабых и сильных магнитных полях.

Классификация железных руд при их обогащении, в частности перед магнитной сепарацией, рассмотрена в работе [1]. Показатели обогащения значительно повышаются, если перед электрической или магнитной сепарацией осуществляется обеспыливание материала. Обеспыливание и классификация железных руд по классам 0,074; 0,08; 0,1; 0,15 мм и более может проводиться на камерных коронных сепараторах ИГДАН.

В работе [1] приведены подробные результаты исследований по обогащению железной руды Оленегорского ГОКа, низкосортных марганцевых продуктов, титансодержащих и хромитовых руд.

Россыпные и коренные месторождения хромитовых руд можно переработать, используя совместно гравитационный и электрический методы обогащения [60]. Электросепарация в этих схемах позволяет отделить проводники хромиты от непроводника оливина, имеющих близкие плотности. Например, высококачественный концентрат, содержащий до 50,3% Cr_2O_3 , получается из бедных коренных месторождений южноафриканских хромитовых руд.

Для хромитсодержащих орегонских песков [60] была разработана схема обогащения, в которой электросепарация использовалась при отделении хромита, ильменита и магнетита от циркона и граната. Указанная смесь минералов поступала на барабанные коронно-электростатические сепараторы после концентрационного стола, который отделял эти тяжелые минералы от кварца, авгита, диопсида, роговой обманки, турмалина.

7.4. ОБОГАЩЕНИЕ РУД ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

Сепарация титано-циркониевых руд

Впервые электрическая сепарация применялась во Флориде (США) для извлечения титановых минералов (ильменит и ру-

тил) из морских отложений [13]. Электрической сепарацией отделялся ильменит от ставролита, магнитная сепарация которых затруднена ввиду их близких магнитных свойств.

Промышленные минералы циркония: циркон, бадделит и эвдиалит встречаются в большинстве случаев в комплексных россыпных и коренных месторождениях. Циркониевые пески преимущественно кварцевого состава содержат, кроме циркона, ильменит, лейкоксен, рутил и монацит. Помимо этих минералов встречаются ставролит, дистен, турмалин, силлиманит, гранат. Частицы циркона часто покрыты окислами железа или карбонатными минералами. Для удаления таких пленок перемешивают водную пульпу руды в течение нескольких десятков минут с добавлением серной кислоты, железного порошка, а иногда и фтористоводородной кислоты [29]. Однако морская соль, покрывающая частицы песка, не мешает электрическому разделению. Возможно это связано с тем, что при сушке и

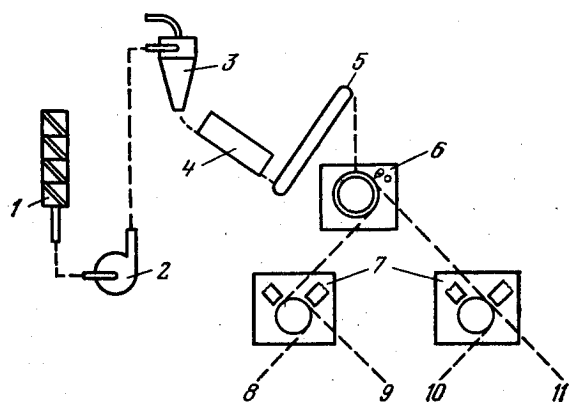


Рис. 7.3. Упрощенная схема цепи аппаратов для обработки минералов титано-циркониевой группы:

1 — классификатор; 2 — насос; 3 — гидроциклон; 4 — сушильный аппарат; 5 — шнек; 6 — электросепаратор; 7 — магнитный сепаратор; 8—11 — продукты разделения соответственно монацит, циркон, ильменит, рутил

обеспыливания вещества, растворенные в морской воде, высушиваются и удаляются потоком воздуха.

Частицы циркона и рутила имеют небольшую проводимость, но рутил имеет очень высокую диэлектрическую проницаемость и поэтому в электрическом поле раньше циркона отрывается от осадительного электрода.

Обычно сепарация рутила и циркона осуществляется при температуре $+100^{\circ}\text{C}$ и ниже, однако известны рекомендации по разделению этих минералов при высокой температуре, превышающей 800°C [29].

Длительное время электросепарация титано-циркониевых руд применяется на предприятиях «Трел Рэдж» (США), «Умгабаба» (ЮАР) и «Траванкоре» (Индия), а также в других странах [1, 61].

В начале 40-х годов на предприятии «Трел Рэдж» перерабатывалось 1000 т/ч сырого песка, из которого получили 50 т/ч

коллективного концентрата. В дальнейшем это предприятие расширялось. Годовая производительность фабрики «Умгабаба» по концентратам составляла: ильменитового — 100 тыс. т; рутилового — 6,5 тыс. т; цирконового — 9 тыс. т.

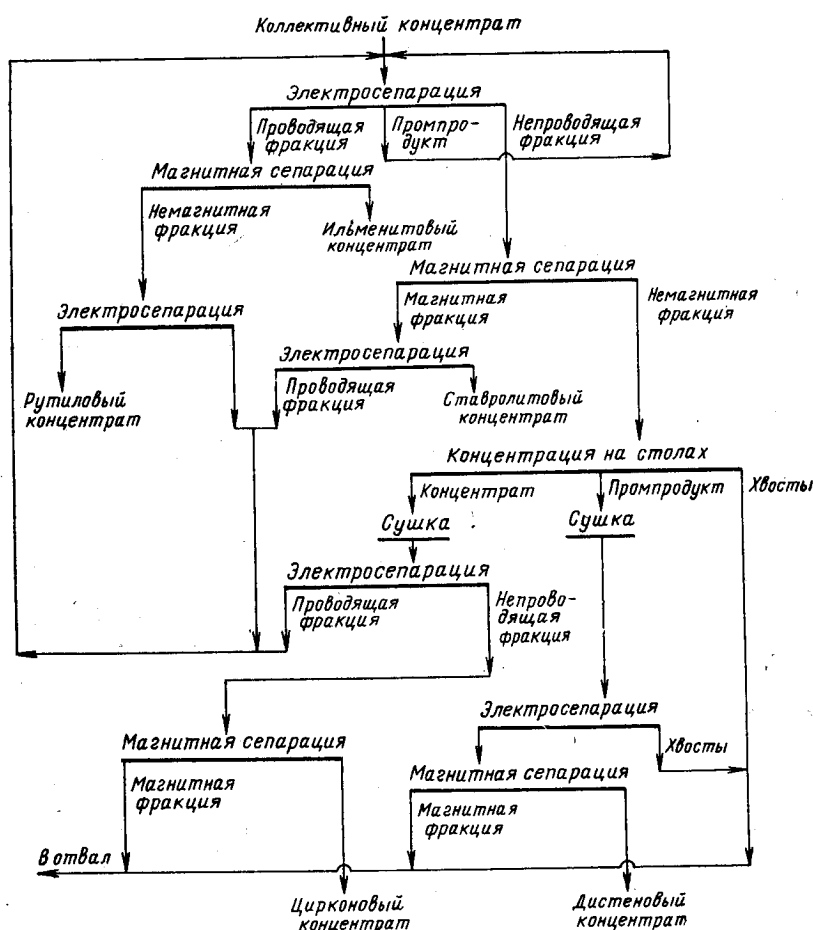


Рис. 7.4. Технологическая схема доводки титано-циркониевого концентрата

Большинство фабрик выдают цирконовые концентраты, содержащие не менее 99% циркона и рутиловые концентраты, содержащие не менее 97% рутила. В технологических схемах предусматривают дезинтеграцию, обесшламливание и гравитационное обогащение с получением коллективного концентрата (рис. 7.3). Далее после обезвоживания и сушки коллективный кон-

центрат обычно поступает на электрическую сепарацию для разделения титансодержащих минералов (проводящая фракция) и циркон-алюмосиликатов (непроводящая фракция). В схемах магнитная и электрическая сепарация применяются совместно, дополняя друг друга.

По схемам, аналогичным показанным на рис. 7.3, получают касситерит, хромит, гранат, шеелит, ставролит, вольфрамит и другие минералы.

Принципиальная схема доводки коллективного титано-циркониевого концентрата одного из месторождений показана на рис. 7.4, а режим и результаты обогащения по этой схеме приведены в табл. 7.8. По схеме разделение проводниковой и не-

Таблица 7.8
Результаты электросепарации
коллективного титано-циркониевого концентрата

Показатели	Коллективный концентрат	Продукт		
		рутиловый	цирконовый	ставролитовый
Выход, %:				
проводящей фракции	28	55	10	26
промпродукта	50	30	40	50
непроводящей фракции	22	15	50	24
Содержание, %:				
в исходном продукте:				
проводящих минералов	60	80—85	8—10	40
непроводящих минералов	40	15—20	90—92	60
непроводящей фракции в проводящей	До 5	1—1,5	25—30	20—25
проводящей фракции в непроводящей	5—6	40—50	2—2,5	5—7
Извлечение основного компонента в конечный продукт, %	85—90	90—95	90—95	80
Циркулирующая нагрузка, %	100	50—75	75—100	100
Температура исходного продукта, °С	90—120	80—100	80—100	35—40
Удельная производительность, т/ч на 1 м длины электрода	2—2,5	2—2,5	1,5—2	1,5—2
Окружная скорость электрода, м/с	3,5	3,5	3,1	3,5
Напряжение, кВ	16—20	20—22	16—20	18—20
Расстояние между электродами, мм:				
осадительным и коронирующим	35—40	40	40	40
осадительным и отклоняющим	5—10	5—10	5—8	5—8

проводниковой фракций осуществляется в коронно-электростатических сепараторах ЭКС-1250, СЭС-2000, а для получения дистенового концентрата применяются трибоэлектрические сепараторы СТЭ.

В дальнейшем схема (см. рис. 7.4) была усовершенствована, введены дополнительные перечистки проводящей и не-

проводящей фракций; при этом качество концентратов, в частности ставролитового, улучшилось.

На всех обогатительных фабриках Австралии доводка коллективных концентратов осуществляется на магнитных и электрических сепараторах. Одна из последних фабрик для переработки коллективного концентрата введена в эксплуатацию в 1975 г. фирмой «Элайд Иниба» [62]. Коллективный концентрат поступает в бункер вместимостью 3500 т, откуда подается на магнитные сепараторы ильменитовой секции, где выделяется ильменитовый продукт, направляемый в два бункера вместимостью 3500 т каждый. Немагнитный продукт поступает на оттирочную установку, где физическими и химическими методами с его зерен удаляются пленки окислов железа. Затем этот продукт промывается в скруббере, обезвоживается на ленточном фильтре до содержания влаги 7%, высушивается в реакторе кипящего слоя и подается на электрические сепараторы с барабаном диаметром 250 мм. Полученные электропроводящие и неэлектропроводящие продукты перечищаются на электростатических сепараторах Рейчерт и индукционно-роликовых магнитных сепараторах с разделением на рутиловый концентрат, направляемый в бункер, монацитовый концентрат, поступающий на последнюю перечистку на магнитных сепараторах, а затем упаковываемый в мешки, и смешанный неэлектропроводящий продукт, содержащий циркон, кварц, кианит и немного проводящих минералов. Смешанный продукт рассеивается на два класса крупности, которые отдельно обрабатываются мокрым способом на винтовых сепараторах и концентрационных столах с получением отвальных хвостов и цирконовых концентратов. Последние обезвоживаются на ленточных фильтрах, сушатся в кипящем слое и перечищаются на электрических сепараторах Рейчерт и пневматических столах, после чего подаются в бункера.

В 70-х годах введены в действие также несколько фабрик, перерабатывающих австралийские прибрежные пески с использованием электрической сепарации [62], например фабрика фирмы «Вестралиан Сэнде» для обогащения ильменитовых песков и фабрика фирмы «Минералс», производительностью 65 тыс. т в год по рутиловому и цирконовому продуктам. На последней фабрике наличие загрязняющих пленок на зернах минералов обусловило применение оттирки и щелочной промывки продукта перед гравитационным обогащением. На фабрике «Геральдон» оттирка, используемая для повышения эффективности электрической сепарации, велась с применением метасульфата натрия и плавиковой кислоты. Однако в 1975 г. после того как число оттирочных аппаратов для питания рутиловой секции было доведено до трех, плавиковая кислота ввиду ее агрессивности и токсичности была исключена; на показателях процесса это не отразилось.

Минерал бадделейт, представляющий собой природную двуокись циркония, извлекают с помощью электросепарации из железных руд Ковдорского месторождения [63]. Он концентрируется в хвостах магнитной сепарации. Доводку бадделейтового продукта осуществляют вначале на концентрационных столах и магнитных сепараторах, позволяющих получать продукт с содержанием до 85—96% ZrO_2 , в котором бадделейт представлен свободными зернами неправильной формы размером от 0,016 до 0,4 мм. Однако полученный концентрат не соответствовал условиям по содержанию примеси железа (0,3%) и серы (0,2%), которые связаны с немагнитными окисленными пирротинном и пиритом. Электрической сепарацией эти сульфиды удаляются в проводниковую фракцию. В результате получается концентрат с содержанием ZrO_2 до 97%. В технологической схеме используются коронно-электростатические сепараторы СЭС-1000М.

Получение оловянных концентратов

Основной минерал олова — касситерит (двуокись олова) отделяют от некоторых сопутствующих минералов гравитационными и флотационными методами. Однако отделять касситерит от вольфрамовых минералов (шеелита), а также кварца, флюорита, сидерита, пирита и других оказывается часто более эффективно электрической сепарацией. В проводящую фракцию выделяется касситерит и пирит, а в непроводящую — шеелит, флюорит, кварц, топаз, кальцит, барит. В отдельных случаях электросепарацией удается разделить касситерит и пирит, при этом касситерит уходит в непроводящую фракцию.

Таблица 7.9

Результаты электросепарации вольфрамито-касситеритового концентрата

Компоненты	Содержание в концентрате, %		
	исходном	вольфрамитовом	касситеритовом
WO_3	39,6	74,0	0,4
Sn	23,7	0,3	73,4
Mn	2,9	4,1	—
SiO_2	1,1	0,4	2,1
S	1,0	0,6	0,4

Электросепарация используется для доводки оловянно-вольфрамовых продуктов магнитного обогащения, уходящих в немагнитную фракцию, а также промпродуктов магнитной сепарации или для доводки продуктов концентрационных столов. Результаты одного из опытов по получению кондиционных кас-

ситеритовых и вольфрамитовых концентратов приведены в табл. 7.9 [30].

Электросепараторы СЭС-1000М установлены для доводки гравитационных концентратов коренных оловянных руд, перерабатываемых комбинатом Хинганолово. Исследования [64] показали, что извлечение олова в проводящую фракцию на материале крупностью 0,5—0,16 мм достигает 94—99%; этот класс составляет 42% от концентрата. Термообработка перед электросепарацией, которая осуществляется в коронно-электростатическом режиме, должна производиться при температуре 180°С с последующим охлаждением до 120°С. Из хвостов электросепарации в электростатическом режиме можно выделить флюоритовый концентрат, отделив его от кварца и кварцсодержащих минералов.

В Малайзии, где производится до 36% мирового производства олова, разрабатываются россыпные месторождения. Типовая схема включает отсадку, магнитную и электрическую сепарации. Исходные пески направляются сначала на грохот, а затем непосредственно на отсадку, которая позволяет получать концентраты с содержанием 20% олова и извлечением до 95%. После доводки с применением магнитных и электрических сепараторов концентраты содержат 70% олова и выше [65].

Доводка тантало-ниобиевых концентратов

Основными танталовыми и ниобиевыми минералами являются танталит-колумбит, пирохлор, микролит, лопарит, которые входят в состав руд, содержащих большое количество разнообразных минералов.

Из минералов, сопутствующих танталу и ниобию, практическое применение имеют: ильменит, рутил, сфен, монацит, циркон, касситерит. Черновые тантало-ниобиевые концентраты по минеральному составу делят на пирохлор-цирконовые и танталит-колумбитовые.

Одна из возможных схем обогащения пирохлор-цирконовых концентратов приведена на рис. 7.5. Технология переработки таких руд включает большое число перечистных операций [30]. Магнитной сепарацией выделяются три магнитные группы минералов и одна немагнитная. На барабанные коронные сепараторы направляется третья магнитная фракция, куда попадают пирохлор, сфен и немагнитная фракция, содержащая сульфиды, циркон, пирохлор. Эти продукты перед электросепарацией прокаливаются при температуре 300°С, что повышает электропроводность пирохлора. Дальнейшее разделение минералов осуществляется флотацией и концентрацией на столах.

Для доводки черновых пирохлоровых концентратов карбонатных руд (апатит, магнетит, гематит, лимонит, пирит, ильменит, анкерит, колумбитизированный пирохлор) применена

схема, включающая мокрую магнитную сепарацию магнетита и электросепарацию немагнитной фракции.

Эффективность сепарации черновых тантало-ниобиевых концентратов повышается после обработки проб минералов ультразвуком [67]. Обработка производилась в водной среде в течение 10 мин на установке, работающей при частоте 22 кГц и интенсивности 3,8 Вт/см². Ультразвуковые колебания очищали

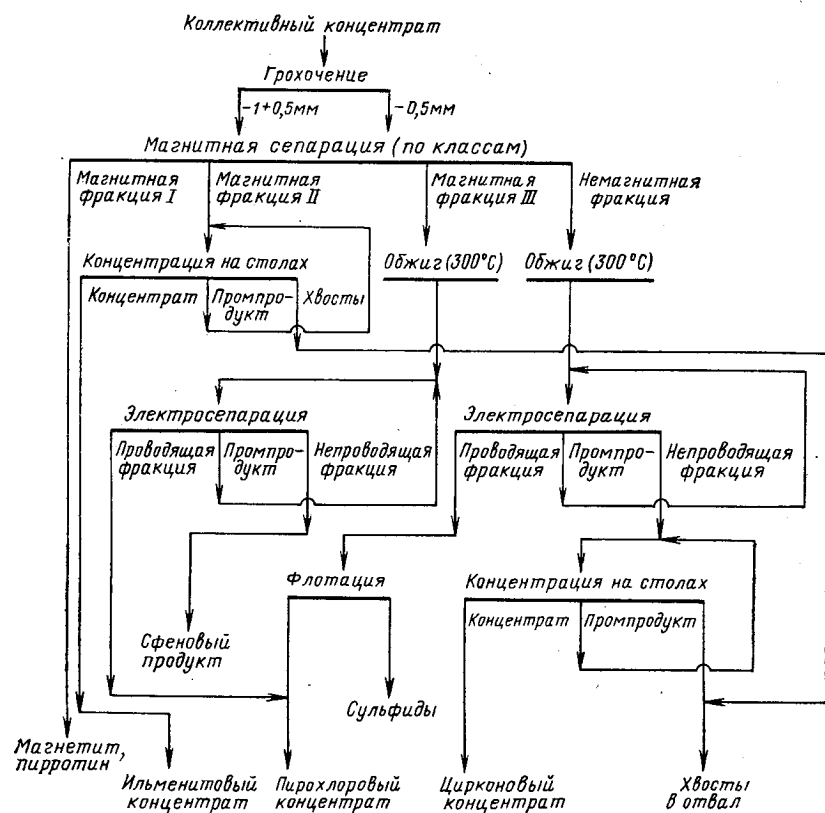


Рис. 7.5. Схема доводки пирохлор-цирконового концентрата

поверхность минералов от инородных пленок и микровключений, в результате чего повышалось извлечение Ta_2O_5 и Nb_2O_5 в проводящую фракцию. Например, после ультразвуковой обработки в воде черного пирохлорового концентрата с исходным содержанием Nb_2O_5 10% извлечение в проводящую фракцию Nb_2O_5 составило 85% при содержании 30,8%. Электросепарация без предварительной обработки позволяла извлекать 80,4% Nb_2O_5 при содержании 20,5%.

Выделение пирохлоровых концентратов на барабанных коронных сепараторах широко используется в том случае, когда ниобиевые минералы представлены колумбитизированным пирохлором с относительно высокой электропроводностью (10^{-6} Ом⁻¹м⁻¹). Светлые разновидности пирохлора и гатчеттолита имеют электропроводность, близкую к электропроводности сопутствующих минералов — апатита, кальцита, кварца и полевого шпата. Поэтому для таких ниобиевых минералов по-

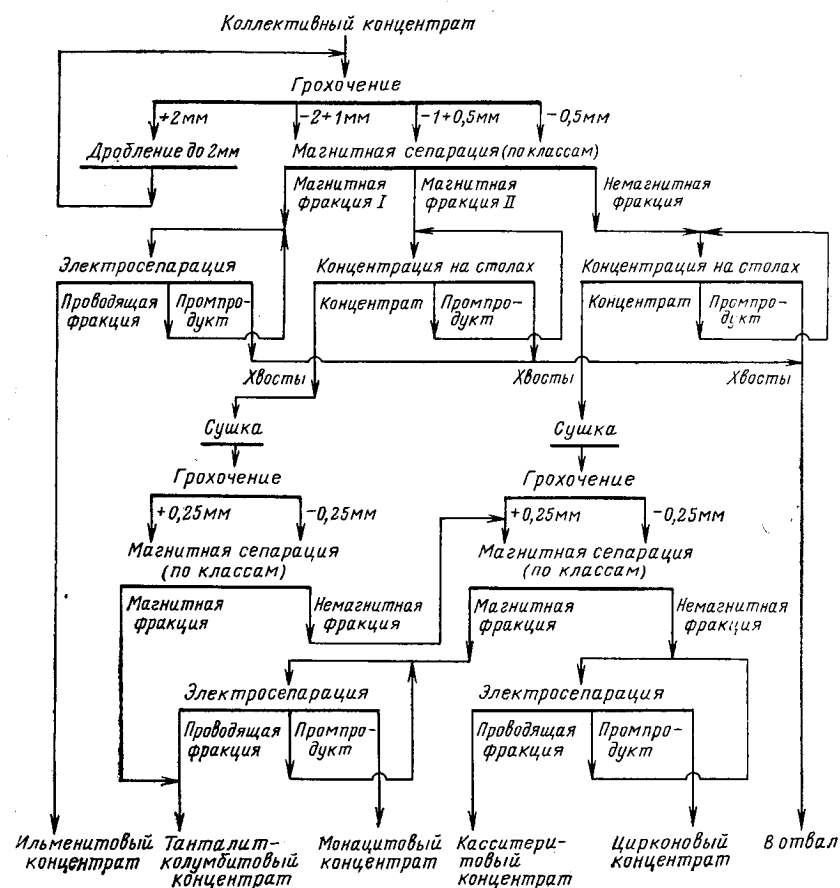


Рис. 7.6. Схема доводки колумбит-танталитового концентрата

казатели сепарации в поле коронного разряда невысоки. В работе [68] предложены для выделения пирохлоровых минералов, имеющих большое сопротивление, трибоэлектрические сепараторы.

В технологических схемах доводки колумбит-танталитовых концентратов для получения самостоятельных тантало-ниобиевых, оловянных, циркониевых и других концентратов используются барабанные электросепараторы, разделяющие минералы по электропроводности.

Одна из схем обогащения представлена на рис. 7.6 [30]. По этой схеме на магнитных сепараторах в сильном поле отделяют танталит-колумбитовый продукт, а в более слабом — ильменит-гранатовый продукт. Некоторые разности монацита и танталит-колумбита имеют близкие магнитные свойства, поэтому слабо магнитную и немагнитную фракции обрабатывают на концентрационных столах и повторно после дополнительной классификации на магнитных сепараторах. На электросепараторах в проводящую фракцию выделяются концентраты: танталит-колумбитовый с содержанием 28% Ta_2O_5 при извлечении 65—70%, касситеритовый с содержанием 49% металлического олова при извлечении 85—87%, ильменитовый с содержанием ильменита 96% при извлечении 94—96%.

Электросепарация применяется в промышленности для выделения лопарита. После гравитации в черновом концентрате кроме лопарита содержатся эгирин, нефелин и полевой шпат [66]. Черновой концентрат обезвоживают, сушат и подвергают электрической сепарации на СЭС-1000М для удаления нефелина, полевого шпата и части эгерина. Температура перед электросепарацией составляет 80—120°С, крупность — 1,0 мм. Проводниковая фракция поступает на электромагнитные сепараторы, немагнитный продукт которых содержит до 95% лопарита.

В Нигерии на одном из предприятий [30] черновые концентраты, предназначенные для доводки на магнитных и электрических сепараторах, содержат 25,8% колумбита, 7,6% касситерита, 6% магнетита, 4,1% ильменита, 4,5% циркона, 5,4% оранжерита, 1,1% ксенотима, 1% монацита и кварц.

Материал классифицируется на узкие классы. Результаты обработки на электросепараторе черного концентрата приведены в табл. 7.10. Проводящая фракция, состоящая из магнетита, ильменита, колумбита, касситерита, подвергается магнитной сепарации. Магнитная фракция (магнетит и ильменит) направляется в отвал. Промпродукт, содержащий колумбит и касситерит, разделяется на столах, а немагнитная фракция, состоящая из касситерита, является готовым продуктом. Непроводящая фракция (фосфаты, силикаты, монацит, ксенотим, торит, циркон) поступает на столы и далее на флотацию.

Таблица 7.10
Результаты электросепарации черного концентрата

Минерал	Содержание, %		Извлечение, %	
	проводящая фракция	непроводящая фракция	проводящая фракция	непроводящая фракция
Колумбит	68,20	15,30	94,15	5,85
Касситерит	23,60	1,93	97,79	2,21
Циркон	0,66	37,10	6,11	93,89
Оранжит	0,23	25,40	3,22	96,78
Прочие	7,31	20,27	—	—

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олофинский Н. Ф. Электрические методы обогащения. М., Недра, 1977.
2. Основы электрогазодинамики дисперсных систем / И. П. Верещагин, В. И. Левитов, Г. З. Мирзабекян и др., М., Энергия, 1974.
3. Месеяншин А. И. Электрические поля варабанных электростатических сепараторов.— Обогащение руд, 1975, № 3, с. 21—26.
4. А. с. 426708 [СССР]. Электростатический сепаратор. Авт. изобрет. А. И. Месеяншин.—Заявл. 21.07.72, № 1813553/22. Оpubл. в Б. И. 1974, № 17.
5. Ужов В. Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. М., Химия, 1967.
6. А. с. 541504 [СССР]. Способ зарядки частиц сыпучего материала перед электросепарацией. Авт. изобрет. П. Н. Дашук, А. И. Месеяншин.— Заявл. 20.08.74, № 2053914/03. Оpubл. в Б. И., 1977, № 1.
7. А. с. 541503 [СССР]. Устройство для зарядки частиц сыпучего материала. Авт. изобрет. П. Н. Дашук, А. И. Месеяншин.— Заявл. 20.08.74, № 2053911/03. Оpubл. в Б. И., 1977, № 1.
8. Джуварлы Ч. М., Вечхайзер Г. В., Штейнрайбер В. Я. Трехосный диэлектрический эллипсоид в электрическом поле при учете проводимости.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1969, № 1, с. 158—162.
9. Fraas F. Electrostatic Separation of High-Conductor Minerals. U. S. Bureau of Mines. Department Interior Report of Investigation, 1964, N 6404.
10. Леб Л. Статическая электризация М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
11. Хопунов Э. И., Ревнивцев В. И. Исследование основных закономерностей трибоэлектризации минералов.— В кн.: Теоретические основы и практика электросепарации тонкоизмельченных материалов. М., 1974, с. 40—52.
12. Ангелов А. И., Лосаберидзе С. И., Пашин М. М. Измерение зарядов частиц кварца и фосфата при электрической сепарации.— Изв. вузов. Горный журнал, 1977, № 4, с. 138—142.
13. Fraas F. Electrostatic Separation of Granular Materials. U. S. Bureau of Mines, 1962, N 603.
14. Влияние энергетической структуры поверхности минералов на электрическую сепарацию и флотацию.— Труды IX Международного конгресса по обогащению полезных ископаемых. Прага, 1970.
15. Дерягин Б. В., Кротова Н. А., Смилга В. П. Адгезия твердых тел. М., Наука, 1973.
16. Попков В. И., Глазов М. И. Кинетика зарядки и динамика волокон в электрическом поле. М., Наука, 1976.
17. Электризация полевых шпатов при деформации и разрушении / Г. И. Шевцов, М. И. Мигунов, Г. А. Соболев и др.— ДАН СССР. Т. 225, № 2, 1975, с. 313—315.
18. Fraas F. Electrostatic Separation with Photoelectric Charging. U. S. Bureau of Mines. Department Interior Report of Investigation, 1972, N 7610.
19. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1955.
20. Волкова З. В., Жусь Г. В., Кузьмин Д. В. Диэлектрическая сепарация различных поликонцентратов и материалов М., Недра, 1975.
21. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М., Наука, 1966.
22. Месеяншин А. И. Электрические силы при электросепарации по проводимости.— Обогащение руд, 1976, № 3, с. 16—19.
23. Schickel A. Teoric a ověřeni elektrického rozdělování a využití při pém vykonu.— Rudy, 1973, N 4, s. 91—96.
24. Попков В. И., Глазов М. И., Пимошин А. А. Экспериментальное исследование зарядки хлопковых волокон в поле коронного разряда при влажности среды от 30 до 80%.— В кн.: Сильные электрические поля в технологических процессах (электронно-ионная технология). М., 1971, вып. V, с. 83—95.
25. Зимон А. Д. Адгезия пыли и порошков. 2-е изд. М., Химия, 1974.
26. Олофинский Н. Ф., Новикова В. А. Трибоадгезионная сепарация М., Недра, 1974.
27. Олофинский Н. Ф., Клемятов А. Н. Влияние влажности материала и окружающей среды на процесс электросепарации калийно-магниевого сырья. В кн.: Переработка минерального сырья. М., 1976, с. 41—48.
28. Ангелов А. И., Набиулин Ю. Н. Электрические сепараторы свободного падения. М., Недра, 1970.
29. Ralston O. G. Electrostatic separation of mixed granular solids. Amsterdam—London—New York.— Elsevier, 1961, p. 262.
30. Карнаузов Н. М. Технология доводки коллективных концентратов с помощью электрической сепарации. М., Недра, 1966.
31. John H. W. P. Die Anwendung der Wirbelschicht—Technik bei der electrostatischen Gesteinsaufbereitung.— Industil der Steine und Erden, 1967, Bd 77, N 11, s. 258—267.
32. Смирнов Б. А. Некоторые вопросы теории и практики электрического обогащения калийных руд.— Труды ВНИИГА. Л., вып. 48, 1966, с. 107—121.
33. Перспективы электрического обогащения калийных руд / Е. А. Смирнов, А. И. Мамедов, А. Н. Клемятов и др.— В кн.: Развитие калийной промышленности. Л., 1970, с. 19—30.
34. Каковский И. А., Ревнивцев В. И. О влиянии состояния поверхности на процесс электрической сепарации минералов с малой электропроводностью.— В кн.: Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых. М., 1962, с. 471—481.
35. Ревнивцев В. И. Разделение пирохлора и циркона методом электрической сепарации. Свердловск, Изд. НТО цветной металлургии, 1957.
36. Austenrieth H. Über die Elektrostatistische Aufbereitung von Kalirohsalzen.— Kali und Steinsalz, 1969, Bd 5, N 5, s. 171—177.
37. А. с. 543417 [СССР]. Коронный электросепаратор. Авт. изобрет. А. И. Месеяншин. Заявл. 14.02.73. Оpubл. в Б. И., 1977, № 3.
38. Месеяншин А. И. Электрическая сепарация в поле короны чередующейся полярности.— Электронная обработка материалов, 1977, № 6 (78), с. 83—85.
39. Месеяншин А. И., Якубовский Я. М. Выделение слюды и обеспыливание при обогащении полевошпатовых руд на электрических сепараторах.— Труды Гипронинметаллоруд. Л., вып. 7, 1978, 73—81 с.
40. Десяренко А. В., Искуменко В. М. Сепараторщик электрических сепараторов. М., Недра, 1970.

41. *Электрозерноочистительные машины*. Под ред. А. М. Басова. М., Машиностроение, 1968.
42. *Патент Франции № 1.418.445*. Заявл. 1.1.64 г. Выдан 11. 10. 1965.
43. *Патент ГДР № 50523*. Заявл. 13.11. 65. Выдан 5.10.1965.
44. *Fricke G.* The use of electrostatic separation processes in the beneficiation of crude potassium salts. Phosphorus and Potassium, 1977, N 90, p. 42—45.
45. *Томига Егё Кёкайси*. Методы обогащения минерального сырья для керамической промышленности (перевод с японского), Т. 72, № 1, 1964.
46. *Inculent Jon J., Bergougnou Maurice A., Bauer Stanley*. Electrostatic beneficiation apparatus for fluidezed iron and other ores. IEEF Trans. Ind. Appl. 1972, 8, N 6, p. 744—748.
47. *Электрическая* сепарация тонкоизмельченных руд во взвешенном состоянии в газовой среде с зарядкой частиц ионизацией или трением / М. Карта, Г. Феррара, К. Дельфа и др.— В кн.: VIII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых. Л., 1968, с. 115—131.
48. *Белов В. И.* Флюидизационно-электростатическая классификация тонкодисперсных материалов. М., Недра, 1977.
49. *Бабашкин В. А., Верецагин И. П.* Измерение напряженности поля коронного разряда методом пробного тела. Под ред. В. И. Попкова.— В кн.: Сильные электрические поля в технологических процессах (электронно-ионная технология). Л., 1971, с. 3—14.
50. *Электростатический* сепаратор с полупроводниковым катодом и скрещенными электрическими и магнитными полями / В. А. Ерчаков, И. И. Крючков, В. А. Королев и др.— Приборы и техника эксперимента, 1972, № 6, с. 36—39.
51. *Linary—Linholm A.* Electrostatishes Trennes von Diamanten mit schweren Begleitmineralien.— Aufbereitungs—Technik, 1960, N 8, s. 447—451.
52. *Чекаловец О. К.* Электрический коронный сепаратор с сетчатыми заземленными электродами.— Труды НИИЦЕММАШ. М., вып. 4, 1966, с. 73—82.
53. *Ревнивцев В. И.* Обогащение полевых шпатов и кварца. М., Недра, 1970.
54. *Diamond G. S.* Electrostatic separation of feldspar and other nonmetallic minerals.— Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 1957, vol. 50, N 547, p. 669—673.
55. *Northcott E., Le Baron I. M.* Application of electrostatics to feldspar beneficiation.— Mining Eng., 1958, vol. 10, N 10, p. 1087—1093.
56. *Деркач В. Г.* Специальные методы обогащения полезных ископаемых. М., Недра, 1966.
57. *Ghosh A. G., Daughney V. F.* High-Tension Separation of Wabush Mines Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 1967, vol. 60, N 667, p. 1323—1328.
58. *Steiler A.* Nenere Entwicklungen auf dem gebiet der electrostatishen Aufbereitung. Zeitschrift für Erzbergbau und Metallhütteren—Wesen, 1966, N 8, s. 410—417.
59. *Обогащение* гематитовой железной руды.— Бюл. иностр. науч.-техн. информ., 1975, № 12, с. 47—48.
60. *Бесов Б. Д.* Современное состояние обогащения хромитовых руд.— В кн.: Теория и практика сепарации в электрическом и магнитном полях. М., Наука, 1972, с. 64—77.

61. *Полькин С. И.* Обогащение руд и россыпей редких металлов. М., Недра, 1967.
62. *Woodcock J. T.* Mineral processing progress in Australasia, 1975, Austral. Mining, 1976, vol. 68, N 9, p. 11—32.
63. *Павлова К. С.* Доводка бадделитового гравитационного концентрата до кондиции двуокиси циркония методом магнитной и электрической сепарации.— Обогащение руд, 1971, № 3 (93), с. 13—15.
64. *Пикулин В. А.* Перспективы применения электрической сепарации для доводки гравитационных концентратов коренных оловянных руд.— Труды Ленинградского горного института, Л., вып. 2, 1971, с. 4—11.
65. *Moncrieff A. G., Lewis P. J.* Treatment of tin ores.— Trans. Inst. Mining and Met., 1977, A86, Apr., p. 56—60.
66. *Никитин А. А., Докшин В. С.* Электросепарация как прогрессивный метод обогащения руд.— Обогащение руд, 1964, № 4, с. 17—21.
67. *Влияние* ультразвука на электрическую сепарацию черновых редкометалльных концентратов / А. В. Мамина, Н. Д. Тютюнник, Н. Д. Докшина, и др.— Цветные металлы, 1971, № 11, с. 75—77.
68. *Корзилова А. П., Тарасова Т. Б.* Селекция трудноразделяемых пироклоровых продуктов методом трибосепарации.— Цветные металлы, 1975, № 1, с. 75—80.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Электрические поля и электрические свойства частиц	5
1.1. Напряженность электрического поля	5
1.2. Электрические поля в электросепараторах	8
1.3. Электрический разряд в воздухе	13
1.4. Коронный разряд	15
1.5. Электрические свойства минералов	20
Глава 2. Зарядка частиц	28
2.1. Зарядка ионизированным газом	28
2.2. Зарядка и разрядка частиц на электроде	31
2.3. Зарядка частиц трением	36
2.4. Другие виды зарядки	43
Глава 3. Силы при электрической сепарации	47
3.1. Силы, действующие на точечные заряды	47
3.2. Диполи во внешнем поле	49
3.3. Силы в неоднородном электрическом поле	51
3.4. Силы зеркального отображения	54
3.5. Электрические силы, действующие на частицы, находящиеся на электроде	55
3.6. Влияние среды на движение частиц	60
3.7. Адгезия	62
3.8. Силы в барабанных сепараторах с электростатическим полем	66
Глава 4. Подготовка материалов к сепарации	71
4.1. Классификация по крупности	71
4.2. Нагрев. Влияние влажности на процесс сепарации	72
4.3. Подготовка поверхности частиц. Реагентная обработка	76
Глава 5. Конструкции электросепараторов	80
5.1. Классификация электросепараторов	80
5.2. Виды барабанных электросепараторов	82
5.3. Конструкции барабанных электросепараторов	86
5.4. Камерные электросепараторы	100
5.5. Лотковые электросепараторы	107
5.6. Ленточные электросепараторы	114
5.7. Электросепараторы с воздушным потоком	118
Глава 6. Электрооборудование электрических сепараторов.	123
6.1. Устройства для получения высокого напряжения	123
6.2. Измерения при высоком напряжении	129
6.3. Высоковольтные электроды	133

Глава 7. Практика электросепарации.	139
7.1. Области применения электросепарации при переработке минерального сырья	139
7.2. Сепарация неметаллорудных материалов	141
7.3. Сепарация руд черных металлов	157
7.4. Обогащение руд цветных и редких металлов	159
Список литературы	170

ИБ № 1249

АНАТОЛИИ ИСАЕВИЧ МЕСЕНЯШИН
**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СЕПАРАЦИЯ
В СИЛЬНЫХ ПОЛЯХ**

Редактор издательства *Т. Д. Новикова*
Художественный редактор *О. Н. Зайцева*
Технические редакторы *А. Г. Иванова, Н. В. Жидкова*
Корректор *Р. Я. Ускова*

Сдано в набор 15.06.78. Подписано в печать 14.11.78.
Г-18464 Бумага № 2 Гарнитура литер. Печать высокая
Печ. л. 11,0 Уч.-изд. л. 11,57 Тираж 1500 экз.
Заказ 1600/6382-11 Цена 60 коп.

Издательство «Недра», 103633,
Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.
Московская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24