

## Лабораторная работа № 5

### Электросепарация

#### 1. Цель работы

Изучение принципа работы электростатического сепаратора, разделяющего материалы по проводимости.

Экспериментальное изучение процесса электросепарации на примере конструкции наклонного пластинчатого электростатического сепаратора.

#### 2. Предварительные сведения

Сепарация основана на том, что различие в физических свойствах приводит к различию в поведении отдельных компонентов смеси в электрическом поле. Известны следующие виды разделения материалов.

1. Разделение, основанное на различии электрической проводимости. Проводящие и диэлектрические частицы на электроде, находящемся под высоким потенциалом, ведут себя различным образом. Проводящие частицы быстро приобретают заряд, аналогичный по знаку заряду электрода, отталкиваются от него и улетают. Частицы с малой электрической проводимостью приобретают заряд медленнее и соответственно удерживаются на электроде большее время.

Применяются барабанный (рис. 5.1) и наклонный пластинчатый (рис. 5.2) сепараторы. В барабанном сепараторе разделение по проводимости происходит на вращающемся барабане, а в пластинчатом - на наклонном плоском электроде из графитизированного материала. Графитизация электродов уменьшает контактное сопротивление между частицами и электродом и улучшает качество разделения. Добавление коронирующих электродов способствует лучшему удерживанию диэлектрических частиц на электроде.

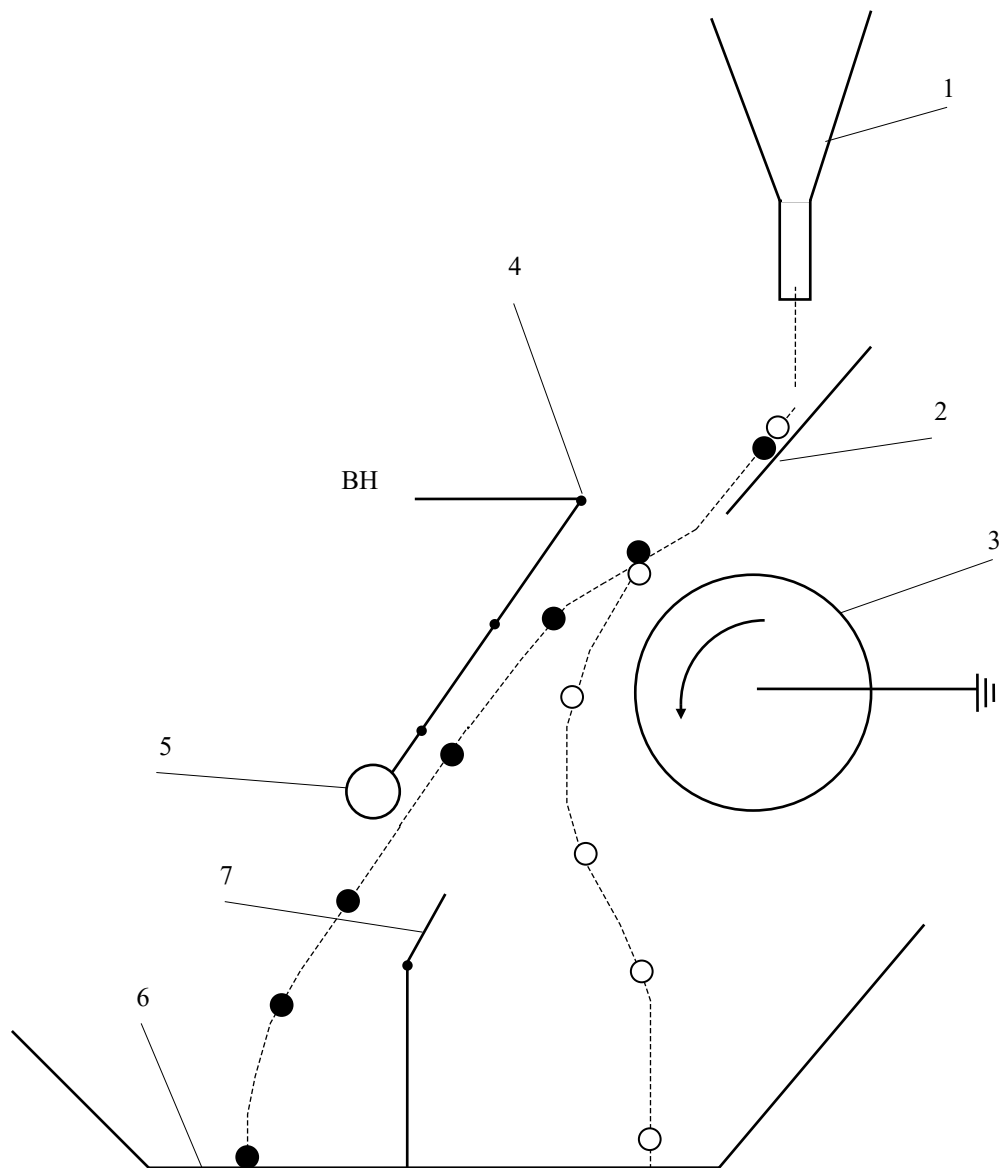


Рис. 5.1 Схема коронного барабанного сепаратора

1 - питатель, 2 - наклонная плоскость, 3 - барабан, 4 - коронирующие электроды, 5 - диэлектрический цилиндр, 6 - приемник, 7 - отсекатель.

● - проводящие частицы; ○ диэлектрические частицы.

2. Разделение, основанное на различии в электризации трением. В результате трения двух частиц из различных материалов о тело, изготовленное из третьего материала, заряды, получаемые этими частицами, различаются по значению, а часто и по знаку. Конструктивно трибоэлектрический сепаратор подобен представленному на рис. 5.2, но зарядный электрод отсутствует, а частицы приобретают заряд, скатываясь по наклонной плоскости. Разделение частиц обычно происходит в электростатическом поле.

3. Разделение, основанное на использовании пьезоэлектрического эффекта. При нагревании смеси частиц из разнородных материалов некоторые из них заряжаются положительно, другие - отрицательно. Пропуская термически обработанный порошок между электродами, создающими электрическое поле, разделяют его по компонентам.

4. Разделение, основанное на различии в диэлектрической проницаемости. В этом случае используется сила, действующая на незаряженную диэлектрическую частицу в неоднородном электрическом поле. Если диэлектрическая проницаемость частицы больше, чем среды, то частица втягивается в область с наибольшей напряженностью, если наоборот, то выталкивается.

Подбирая соответствующим образом диэлектрическую жидкость, в которой происходит сепарация, можно добиться того, что компоненты смеси будут двигаться в противоположных направлениях и выделяться в различных приемниках.

5. Разделение, основанное на различии в массе частиц. На этом принципе работает коронный камерный сепаратор (рис. 5.3). Частицы разного размера падают в промежутке между коронирующим и осадительным электродами. На начальном участке движения они заряжаются и приобретают горизонтальную составляющую скорости. В результате движения в горизонтальном направлении и под действием силы тяжести частицы достигают приемных отсеков, причем место осаждения зависит от их массы, а при частицах из одного материала -

от их размеров. В правой части приемника собираются мелкие частицы, а в левой - самые крупные.

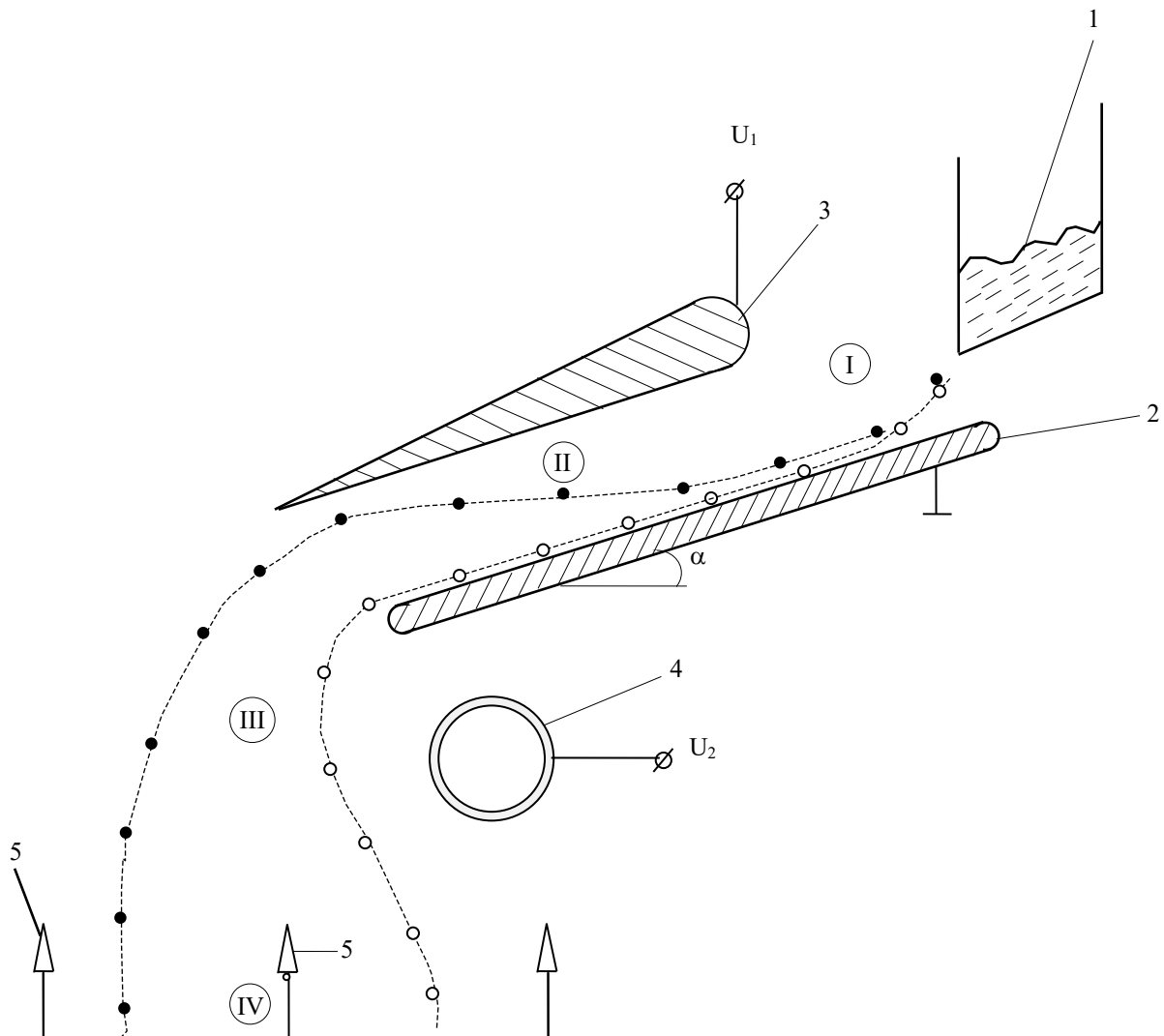


Рис. 5.2 Схема пластинчатого наклонного сепаратора

1 - бункер - питатель, 2 - зарядный электрод, 3 - верхний электрод - крыло, 4 - нижний электрод - цилиндр, 5 - отсекатели.

I - зона трибозарядки, II - зона селективной зарядки ( индукционной перезарядки), III - зона разделения, IV - зона осаждения.

● - проводящие частицы; ○ - диэлектрические частицы

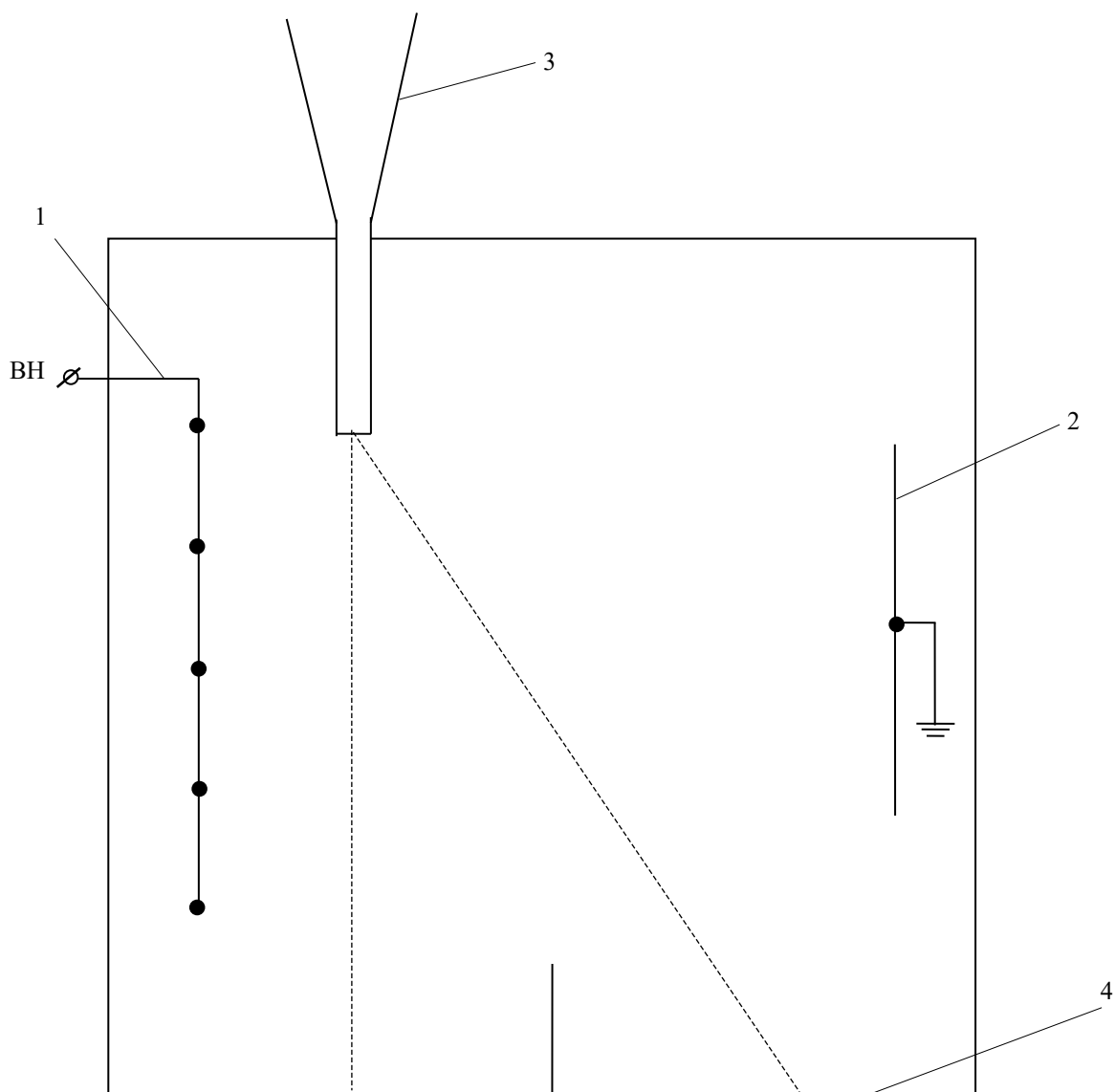


Рис. 5.3 Схема коронного камерного сепаратора

1 - коронирующие электроды, 2 - осадительная плоскость,  
3 - питатель, 4 - приемники.

Наибольший размер частиц, разделяемых в коронном камерном сепараторе, составляет 4-5 мм, а наименьший - 40-50 мк, что определяется существенным влиянием электрического ветра на движение частиц такого размера.

Среди различных видов электросепараторов наибольшее распространение получили коронные барабанные, так как они обеспечивают достаточно высокую степень извлечения полезного продукта из руды (свыше 90 %). Недостатком коронных барабанных сепараторов является наличие вращающихся частей и привода, работающего в сильно запыленной среде. В последнее время все

шире используются пластинчатые сепараторы, которые более удобны в эксплуатации и обеспечивают более высокую производительность.

В настоящей работе изучается наклонный пластинчатый электростатический сепаратор рис. 5.2.

Рассмотрим подробнее разделение смеси минералов на фракции.

Частицы минералов, высыпаясь из бункера-питателя 1 на зарядный пластинчатый электрод 2, поступают в область между верхним отклоняющим электродом 3 и пластиной 2, где проводящие частицы отклоняются к электроду 3 и попадают в приемник проводников. Непроводящие частицы, ссыпаясь с пластины 2, отклоняются к нижнему отклоняющему электроду 4 и попадают в приемник для непроводников. Отсекатели 5 помогают регулировать разделение минералов. Электрод 2 заземлен, к электродам 3 и 4 приложено напряжение разных знаков. Заземленный зарядный электрод (пластина) 2 выполнен из графитопласта марки АТМ-1.

Рассмотрим основные стадии процесса сепарации. Анализ конструкции, режимов работы, характеристики обогащаемых минералов позволяют выделить четыре основные стадии процесса электросепарации.

Стадия предварительной зарядки ( зона I на рис. 5.2). В сепараторе она реализуется путем трибозарядки. В зависимости от знака образующегося трибозаряда должен выбираться знак прикладываемых потенциалов, т.е. необходимо чтобы полярность напряжения  $U_1$  была такой же как и полярность заряда диэлектриков:

$$\text{знак } [U_1] = \text{знак } [q_{\text{диэл}}], \tag{5.1}$$

$$\text{знак } [U_2] = - \text{знак } [U_1].$$

Знак трибозарядов проводящих частиц при выборе полярности прикладываемого напряжения в электросепараторе играет второстепенную роль.

Стадия селективной зарядки и отрыва частиц ( зона II на рис. 5.2). Эта стадия характеризуется образованием зарядов разных знаков на проводниках и

непроводниках. В сепараторе это осуществляется за счет индукционной перезарядки частиц в электрическом поле между зарядным электродом 2 и отклоняющим электродом 3.

В этой зоне проводящие частицы быстро заряжаются и приобретают заряд, знак которого противоположен полярности напряжения  $U_1$ , т.е. противоположен знаку зарядов непроводящих частиц. Последние перезаряжаются медленно и за время движения в зоне II не успевают изменить свой знак. Таким образом, в зоне II на разделяемых минералах получаются заряды разных знаков.

Индукционный заряд частиц рассчитывается по формуле:

$$q = q_{\infty} + (q_{\text{нач}} - q_{\infty}) e^{-t/\tau}, \quad (5.2)$$

где  $q_{\text{нач}}$  - начальный заряд частицы;  $q_{\infty}$  - предельный заряд частицы, приобретаемый за счет индукционной зарядки при  $t \rightarrow \infty$ ;  $\tau$  - постоянная времени индукционной зарядки.

Если обозначить через  $t_{\text{дв}}$  - время движения частицы в электрическом поле, то из (5.2) получаются следующие соотношения:

для непроводников  $q_{\text{нач}} < 0, t_{\text{дв}} / \tau_{\text{диэл}} \rightarrow 0, q = q_{\text{нач}} < 0$ ;

для проводников  $q_{\text{нач}} \geq 0, t_{\text{дв}} / \tau_{\text{диэл}} \rightarrow \infty, q = q_{\infty} > 0$ .

Это дает возможность сформулировать следующее требование к процессу сепарации:

$$\tau_{\text{пров}} \ll t_{\text{дв}} \ll \tau_{\text{диэл}}, \quad (5.3)$$

В первом приближении можно считать, что  $\tau = \varepsilon\varepsilon_0/\gamma$  - постоянная времени,  $\varepsilon$  и  $\gamma$  - диэлектрическая проницаемость и проводимость частиц соответственно,  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая постоянная.

Учитывая, что величина  $\varepsilon$  меняется в меньшем диапазоне, чем проводимость  $\gamma$ , то естественно называть данный способ сепарации по проводимости.

Перезарядка (или селективная зарядка) является необходимым условием сепарации частиц, но не достаточным. Частицы должны разделиться в пространстве. Это условие можно сформулировать следующим образом

$$\text{для проводников } (F_{\text{эл}} - (mg)_{\text{Е}} - F_{\text{ад}})_{\text{пров}} \geq 0, \quad (5.4)$$

$$\text{для диэлектриков } (-F_{\text{эл}} - (mg)_{\text{Е}} - F_{\text{ад}})_{\text{диэл}} < 0,$$

где  $F_{\text{эл}}$  - электрическая сила, действующая на частицу;  $(mg)_{\text{Е}}$  - составляющая силы тяжести частицы, направленная перпендикулярно поверхности электрода;  $F_{\text{ад}}$  - сила адгезии между частицей и электродом.

Стадия разделения и движения в электрическом поле ( зона III на рис. 5.2). Движение проводящих частиц после отрыва от электрода описывается уравнениями

$$m \frac{d\bar{V}}{dt} = q\bar{E} + m\bar{g} + \bar{F}_{\text{сопр}}, \quad (5.5)$$

$$E = f(x,y), q = \text{const},$$

где  $\bar{V}$  - вектор скорости движения частицы,  $m$  - масса частицы,  $\bar{g}$  - вектор ускорения свободного падения,  $\bar{E}$  - вектор напряженности электрического поля, зависящий от координат точки нахождения частицы,  $q$  - заряд частицы, ко-



торого она достигла в момент отрыва от электрода,  $\overline{F}_{\text{сопр}}$  - вектор силы сопротивления среды движению частицы.

Непроводящие частицы продолжают движение вдоль поверхности электрода, а после ссыпания с него их движение описывается уравнениями (5.5).

Стадия сбора частиц ( зона IV на рис. 5.2). Это зона действия отсекаателей, положение которых определяется движением разделяемых частиц в зоне III.

Таким образом, разделение минералов в пластинчатом сепараторе возможно, если для всех минералов коллективного концентрата выполняются условия (1), (3) и (4).

Указанные выше стадии в той или иной мере характерны для всех электросепараторов, характеризуются одними и теми же законами и отличаются только количественно. Так например, барабанный коронно-электростатический сепаратор имеет стадии предварительной зарядки в поле коронного разряда, перезарядки и отрыва в области действия отклоняющего электрода, движения в электрическом поле после отрыва частиц в направлении к соответствующим приемникам.

Важное значение для понимания процесса имеет характер движения частиц в сепараторе.

Частицы из бункера-питателя поступают на наклонный зарядный электрод за счет вибрации лотка питателя. Это приводит к тому, что частицы уже в начальный момент времени имеют некоторую скорость. Так как частицы имеют разные размеры и разную форму и так как воздействие вибрации на частицы во многом имеет случайный характер, то уже в начальный момент для частиц характерен разброс начальных скоростей по величине и по направлению.

Далее частицы движутся под действием силы тяжести. Некоторую часть своего пути по зарядному электроду они движутся при отсутствии электрического поля (зона I). При этом движение частиц имеет сложный характер в виде скачков над электродом. И такое парение говорит о том, что значительную часть времени в сепараторе частицы находятся в полете.

Пройдя весь зарядный электрод, частицы ссыпаются с него и попадают в приемники продуктов разделения. Траектории частиц при гравитационном ссыпании (при отсутствии напряжения на электродах), хотя и расположены в достаточно узкой области, однако представляют из себя веер. Такой веер, т.е. разброс траекторий в отсутствие электрического поля, объясняется разной крупностью частиц минералов и соответствующими различиями в скорости слета частиц с пластины сепаратора и скоростях седиментации при движении к приемнику продуктов. Попав в секционированный приемник продуктов разделения, частицы минералов образуют некоторое распределение массы частиц по ячейкам приемника. Это распределение носит условное название веера минерала. Графически его можно построить как процентное распределение массы по приемникам:

$$A = \frac{m_i}{\sum m_i},$$

где  $m_i$  - масса частиц в  $i$  - том приемнике,  $\sum m_i$  - масса частиц во всех приемниках.

Анализ движения частиц в сепараторе при отсутствии поля показывает, что частицы распределяются в приемнике согласно своим размерам, форме и плотности, однако образующийся гравитационный веер является узким, поэтому гравитация не позволяет разделить различные минералы на фракции, особенно по составу вещества минералов.

При подключении напряжения к электродам между верхним и нижнем электродами возникает электрическое поле. В этой зоне характер движения изменяется. Увеличиваются размеры скачков, слой частиц как бы расширяется по высоте и поднимается над электродом. Траектории частиц с ростом напряжения становятся все выше и, наконец, частицы отлетают от зарядного электрода.

Для движения частиц после отрыва от зарядного электрода характерно расширение и смещение веера по сравнению с гравитационным ссыпанием.

Частицы проводников движутся влево и к верхнему отклоняющему электроду. Веер диэлектрического минерала смещается вправо. Такое изменение вееров говорит о разных знаках заряда минералов. При значительном повышении напряжения диэлектрик также, как и проводник, начинает смещаться влево. Этот момент связан с изменением знака заряда частиц диэлектрика.

Рассматривая веера минералов, следует иметь в виду, что, являясь конечным результатом процесса, они существенно зависят от временных факторов и параметров режима разделения.

### 3. Описание установки

Экспериментальная часть работы проводится на стенде, основу которого составляет лабораторный сепаратор.

В состав сепаратора входит: корпус, электродная система, приемник продуктов разделения, вибропитатель, источник высокого напряжения, пульт управления. Все составляющие сепаратора объединены конструктивно в одном корпусе (рис. 5.4).

Корпус I сепаратора имеет смотровое окно для обеспечения хорошего визуального контроля всех этапов сепарации, дверь для обеспечения удобства эксплуатации и ремонта. Дверь снабжена запором и блокировочными контактами, отключающими электрическое питание источника высокого напряжения сепаратора при открывании двери.

Электродная система содержит три электрода: между двумя высоковольтными электродами 2 и 3 разной полярности размещен заземленный электрод 4.

Верхний электрод 2 выполнен из проводящего материала в виде крылообразного клина с полусферическими закруглениями краев. Крепление крыла обеспечивает изменение угла его наклона, продольное и вертикальное перемещение относительно заземленного электрода-плоскости 4. Диапазоны регулирования: угол наклона -  $\pm 20^{\circ}$ , продольное перемещение - 100 мм, вертикальное перемещение - 25 мм. Размеры электрода 200 x 200 x 25 мм. Электрод снабжен

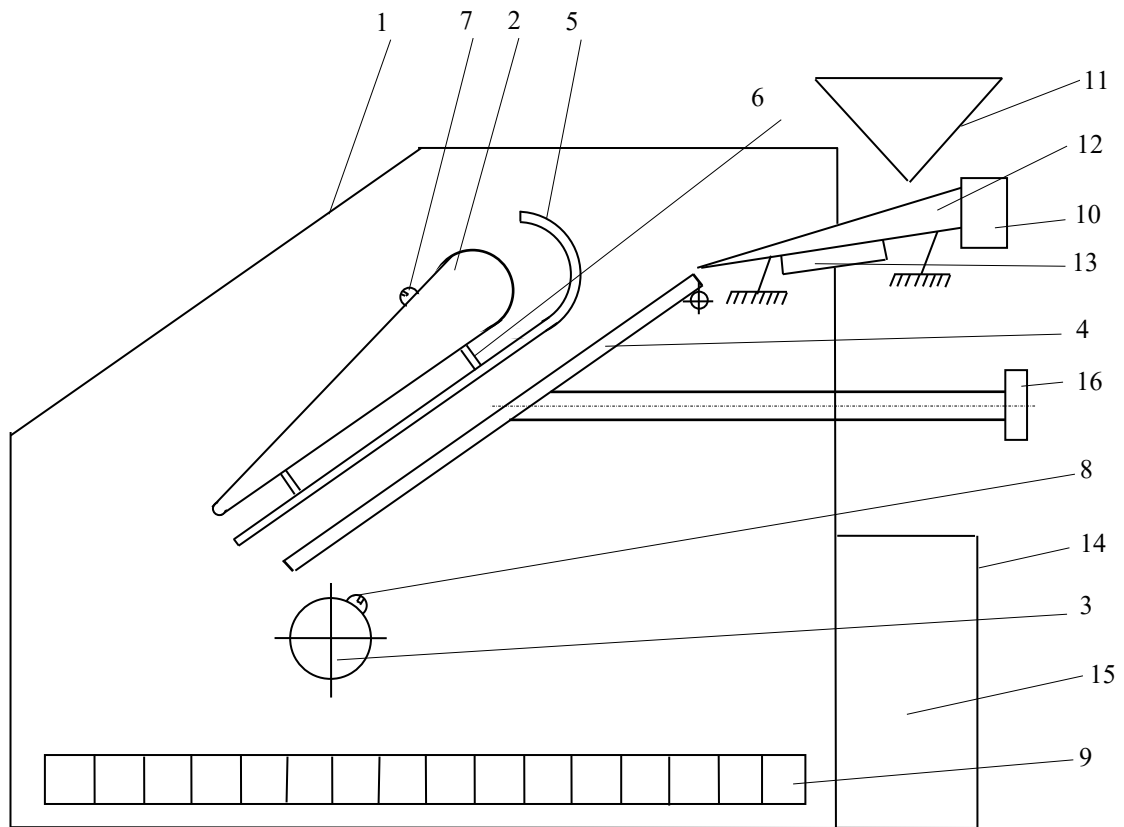


Рис. 5.4 Схема лабораторного пластинчатого электростатического сепаратора  
 1 - корпус, 2 - верхний электрод - крыло, 3 - нижний электрод - цилиндр,  
 4 - заземленный электрод - плоскость, 5 - прокладка диэлектрическая, 6 - винты  
 диэлектрические, 7 - клемма верхнего электрода, 8 - клемма нижнего электрода,  
 9 - приемники продуктов разделения, 10 - вибратор, 11 - бункер загрузочный,  
 12 - вибралоток, 13 - нагреватель лотка, 14 - блок питания, 15 - панель управле-  
 ния, 16 - ручка регулирования наклона электродной системы.

диэлектрической прокладкой 5. Электрод снабжен клеммой 7 для подключения кабеля источника высокого напряжения.

Нижний электрод 3 выполнен в виде цилиндра из проводящего материала с возможностью регулирования его положения относительно заземленного электрода-пластины 4. Размер электрода  $\varnothing 75 \times 200$  мм.

Заземленный электрод-пластина 4 выполнен из проводящего материала - графитопласта. Габаритные размеры  $220 \times 200 \times 10$  мм. Электрод выполнен с

возможностью изменения угла наклона относительно горизонтали в пределах от  $30^{\circ}$  до  $60^{\circ}$ .

Приемники 9 продуктов разделения расположены под нижним электродом 3 на расстоянии не менее 50 мм. Приемники 9 выполнены в виде отдельных секций размером 370 x 30 x 30 мм каждая, скрепляемых друг с другом и размещенных на общем выдвижном поддоне.

Вибропитатель 10 выполнен с бункером 11 и лотком 12 шириной 80 мм. Скорость подачи разделяемого материала в сепаратор изменяется путем регулировки напряжения питания вибропитателя. Лоток 12 питателя снабжен нагревателем 13 с регулировкой температуры.

Источник 14 высокого напряжения выполняется с двумя выходами различной полярности. Максимальное выходное напряжение - 15 кВ, регулирование напряжения - плавное. Тип выходного напряжения - постоянное.

Источник выполняется встроенным в корпус сепаратора. Приборы контроля и регулирования вынесены на общий пульт управления 15.

Для заземления корпуса сепаратора предусмотрена клемма, расположенная на задней стороне корпуса.

Пульт управления 15 (рис. 5.5) включает прибор контроля высокого напряжения, регуляторы, сигнальные лампочки и тумблеры включения и отключения высокого напряжения, нагрева лотка питателя и вибратора. Имеется общий тумблер включения и отключения сети. Предохранитель и шнур питания с вилкой вынесены на заднюю стенку корпуса сепаратора.

В состав лабораторного стенда входят аналитические весы для взвешивания минералов, прошедших разделение и емкости с демонстрационными пробами минералов проводника и диэлектрика.

В качестве исследуемых минералов используются рутил, циркон и их смесь. Рутил - природный минерал  $TiO_2$ , циркон -  $Zr[SiO_4]$ . Типичные представители проводникового и диэлектрического минералов.

#### 4. Порядок проведения работы

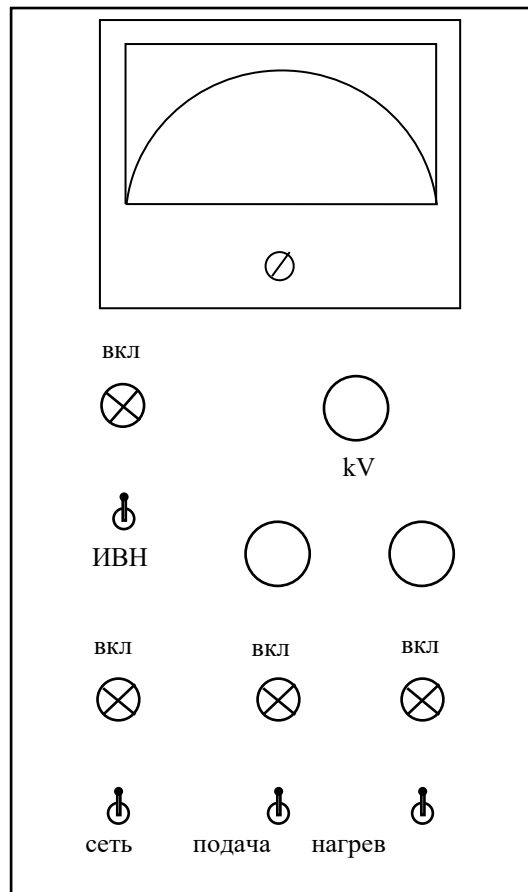


Рис. 5.5 Пульт управления

1. Навеску минерала массой 70 - 100 г и засыпать в бункер.
2. Установить по указанию преподавателя геометрические параметры сепаратора: угол наклона и взаимное расположение электродов (угол  $35 - 40^{\circ}$ , высота крыла 20 - 30 мм, отклонение барабана от вертикали 10 - 15 мм).
3. Закрыть дверцу сепаратора.
4. Включить тумблер “сеть”.
5. Включить нагрев лотка питателя. Нагрев осуществляется 5 - 10 мин.
6. Включить тумблер высокого напряжения. Установить необходимый уровень напряжения на электродах (7 - 10 кВ).
7. Включить вибропитатель. Ручкой регулировки установить скорость ссыпания порошка, соответствующую монослойной подаче частиц.

8. После ссыпания всего порошка установку отключить в обратной последовательности.

9. Вынуть лоток с ячейками приемника продуктов разделения. Произвести взвешивание порошка из каждой ячейки на аналитических весах с точностью до 0,001 г.

10. Лоток с приемниками продуктов очистить кисточкой и установить на место.

### 5. Задание на предварительную подготовку

1. Ознакомиться с настоящим описанием и рекомендованной литературой.

2. Ознакомиться с назначением элементов сепаратора и последовательностью выполнения измерений.

### 6. Задание на проведение работы

1. Ознакомиться с конструкцией лабораторного сепаратора.

2. Провести измерения гравитационных вееров рутила и циркона. Геометрические параметры задаются преподавателем.

3. Провести измерения вееров рутила и циркона при наличии напряжения на электродах для геометрических параметров сепаратора, заданных преподавателем.

4. По результатам измерений п. 2. и 3 построить графики вееров. Сравнить и объяснить полученные результаты.

5. Провести разделение смеси минералов в режиме п. 3

6. Построить веер по данным п. 5. Описать веера и объяснить результаты.

### 7. Контрольные вопросы

1. Поясните назначение основных элементов сепаратора.
2. Поясните понятие веер минералов и почему он образуется.
3. Поясните принцип работы сепаратора по проводимости.
4. Какие характеристики частиц и как влияют на разделение минералов?
5. Какие конструктивные параметры сепаратора и как влияют на разделение минералов?
6. Как влияют режимы сепаратора на разделение минералов?

#### Литература.

1. Основы электрогазодинамики дисперсных систем/ И.П.Верещагин и др. - М.: Энергия, 1974.
2. Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учеб. для вузов/ И.М.Бортник, И.П.Верещагин, Ю.Н.Вершинин и др. Под ред. И.П.Верещагина, В.П.Ларионова - М.: Энергоатомиздат, 1993. с.254-258, 268-273, 321-323.