

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Ю.Л. Папушин

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
по дисциплине
"Магнитные и электрические процессы обогащения"
для студентов специальности 7.050303
("Обогащение полезных ископаемых")**

Утверждено на заседании
учебно-издательского совета ДонНТУ

Протокол № 1 от 25.10.2007 г.

Донецк – 2007

УДК 622.7

Конспект лекций по дисциплине "Магнитные и электрические процессы обогащения", (для студентов специальности 7.050303 «Обогащение полезных ископаемых» дневной и заочной форм обучения) /Ю.Л. Папушин. – Донецк: ДонНТУ, 2007. –65 с.

Конспект подготовлен в соответствии с действующей программой дисциплины "Магнитные и электрические процессы обогащения".

Составитель проф. Ю.Л. Папушин

Рецензенты к.т.н. В.Н.Бредихин

1 ВВЕДЕНИЕ

1.1 Роль магнитных методов обогащения в промышленности страны

Магнитные методы обогащения органически связаны с горно-металлургической и рядом других отраслей промышленности. Магнитные процессы обогащения призваны подготавливать руды, обладающие магнитными свойствами, к дальнейшей переработке. Кроме того, данные методы широко используются при доводки (получение требуемого качества) концентратов руд редких металлов, при очистки от магнитных включений горно-химического сырья.

Магнитное обогащение получило применение и в углеобогатительной промышленности в качестве метода регенерации магнетитовых суспензий при тяжело-среднем обогащении.

1.2 Характеристика объектов магнитного обогащения

Основным объектом магнитного обогащения является **руда**. Под рудой понимают природное минеральное сырье, содержащее какой-либо металл или несколько металлов в концентрациях и видах, пригодных для промышленного использования.

Магнитному обогащению подвергаются руды, содержащие минералы, обладающие магнитными свойствами, достаточными для разделения сырья по данному признаку. Это руды, содержащие железо, марганец, хром и ряд других металлов.

Наибольший объем руд, обогащаемых магнитными методами, относится к железным рудам, составляющих основу металлургической промышленности страны.

К *железным рудам* относятся магнетитовые, гематитовые, сидеритовые и бурожелезняковые руды.

Магнетит (Fe_3O_4) – сильномагнитный минерал черного цвета, содержит 72.4 % железа, плотность 4.9 – 5.2 г/см³. Основное месторождение **магнетитовых** руд в Украине - Криворожский бассейн, где сосредоточены магнетитовые кварциты. Сопутствующие минералы – гематит, кремнезем, глинозем, пирит, ильменит (титано-содержащий минерал). Магнетитовые кварциты – основное сырье черной металлургии Украины.

При значительном содержании ильменита в магнетитовой руде последние называют **титаномагнетитовые руды**.

Гематит (Fe_2O_3) – слабомагнитный минерал красно-бурого цвета, содержит около 70 % железа. Попутно извлекается с магнетитовыми кварцитами в Кривбассе.

Сидерит (FeCO_3) – слабомагнитный минерал, содержит 48 % железа. Сидеритовые руды весьма ценны для металлургической промышленности, в Украине отсутствуют.

Бурый железняк ($n\text{Fe}_2\text{O}_3m$) – слабомагнитный минерал, руды невысокого качества, промышленное использование незначительно.

Марганцевые руды относятся к слабомагнитным, состоят из смеси различных минералов: гаусманит (Mn_3O_4), пиролюзит (MnO_2), манганит ($Mn_2O_3 \cdot H_2O$), браунит (Mn_2O_3) и др.

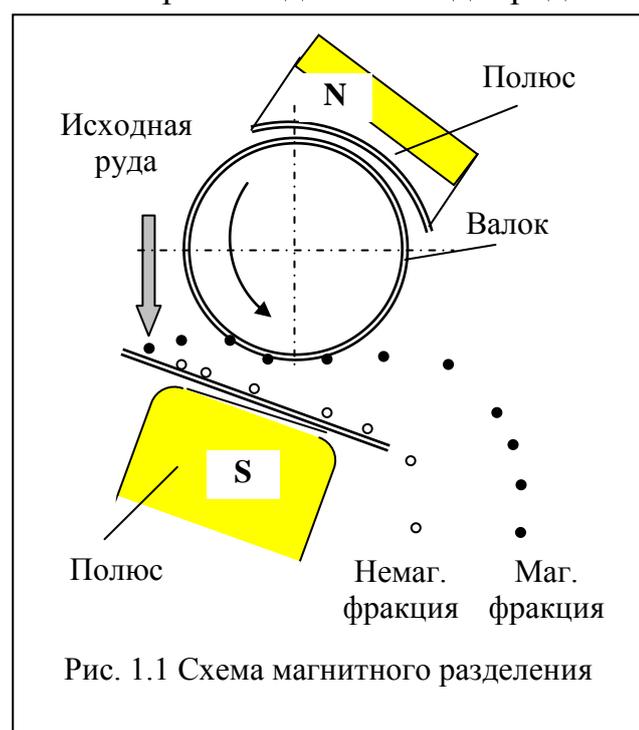
Марганцевые руды сосредоточены в Никопольском месторождении.

Хромовые руды состоят из хромистых железняков, содержащих Cr, Fe, O, а также Mg, Al. По физическим свойствам руды сходны с железными, но обладают меньшими магнитными свойствами.

1.3 Сущность магнитного обогащения

Магнитное обогащение основано на использовании различия магнитных свойств разделяемых минералов. Сущность метода заключается в воздействии на частицы руды магнитной и механических сил, в результате которого частицы с отличающимися магнитными свойствами приобретают различные траектории движения. Это позволяет магнитные частицы исходной руды концентрировать в отдельный магнитный продукт (чаще всего "концентрат"), а немагнитные – в немагнитную фракцию (отходы).

Магнитное обогащение осуществляется в магнитных сепараторах, в рабочей зоне которых создается неоднородное магнитное поле (Рис 1.1).



На схеме исходная руда питателем подается на наклонный лоток (например, вибрационный). Материал перемещается в рабочую зону сепаратора, где начинает действовать магнитное поле, образованное полюсами N и S. Магнитные частицы (черные) под действием магнитной силы притягиваются к рабочему органу сепаратора (валку) и выносятся им из зоны действия магнитного поля. Под действием механических сил (центробежная, сила тяжести) эти частицы сбрасываются с поверхности валка и собираются в приемнике концентрата (маг. фракция).

Немагнитные частицы не притягиваются к валку и транспортируются лотком в приемник немагнитной фракции.

Очевидно, что условием магнитного разделения является превосходство магнитной силы, действующей на магнитные частицы, над механическими, с другой стороны, на немагнитные частицы, действующие механические силы должны превосходить магнитную силу.

2 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТНОГО ОБОГАЩЕНИЯ

2.1 Магнитное поле и его параметры

Магнитное поле - особая форма материи, существующая вокруг движущихся зарядов (проводников с током или полюсов постоянных магнитов). В последнем случае магнитное поле обусловлено элементарными электрическими токами, существующими в веществе магнита.

Теория магнитного поля находится в постоянном развитии, для данного курса важно знать некоторые характеристики магнитного поля.

Магнитное поле иногда изображается силовыми линиями, общее число которых, пронизывающих ортогональную плоскость, наз. *магнитным потоком* - Φ . Единица измерения - **Вебер (Вб)**.

Основной характеристикой магнитного поля является *магнитная индукция* - B , которая численно равна количеству магнитных силовых линий, пронизывающих площадь в 1 м^2 данного сечения. Величина векторная. Единица измерения - **Тесла (Тл)**.

Согласно определению: $B = \Phi/S$ (2.1)

Важнейшей характеристикой магнитного поля является *напряженность* - H , единица измерения - **А/м (кА/м)**.

В вакууме справедлива связь: $B = \mu_0 H$, (2.2)

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ - *магнитная проницаемость вакуума*.

В иной среде: $B = \mu \mu_0 H$, (2.3)

где μ - *магнитная проницаемость среды* (безразмерная величина).

μ показывает во сколько раз сила, действующая на движущие заряды в данной среде больше, чем в вакууме.

Магнитное поле может быть *однородным и неоднородным*. Для первого случая напряженность поля - величина постоянная в разных его сечениях.

Неоднородность поля характеризуется показателем - градиентом напряженности поля - $\text{grad } H = dH/dx$, где x - линейное перемещение.

В однородном магнитном поле ($\text{grad } H = 0$) магнитные частицы подвергаются воздействию вращающего момента, который ориентирует их параллельно силовым линиям поля.

В неоднородном магнитном поле магнитные частицы испытывают силу притяжения в направлении более интенсивного участка поля.

2.2 Краткая характеристика магнитных свойств веществ

Для характеристики намагниченности вещества в магнитном поле используется *магнитный момент* (P_m). Он численно равен механическому моменту, испытываемому веществом в магнитном поле с индукцией в 1 Тл.

Магнитный момент единицы объема вещества характеризует его *намагниченность* - I , определяется по формуле:

$$I = P_m/V, \quad (2.4)$$

где V - объем вещества.

Намагниченность в системе СИ измеряется, как и напряженность, в А/м, величина векторная.

Магнитные свойства веществ характеризуются *объемной магнитной восприимчивостью* - χ_o , величина безразмерная.

Если какое-либо тело поместить в магнитное поле с индукцией \mathbf{B}_0 , то происходит его намагничивание. Вследствие этого тело создает свое собственное магнитное поле с индукцией \mathbf{B}' , которое взаимодействует с намагничивающим полем.

В этом случае вектор индукции в среде (\mathbf{B}) будет складываться из векторов:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}' \text{ (знак вектора опущен),} \quad (2.5)$$

где \mathbf{B}' - индукция собственного магнитного поля намагнитившегося вещества.

Индукция собственного поля определяется магнитными свойствами вещества, которые характеризуются объемной магнитной восприимчивостью - χ_o , справедливо выражение:

$$\mathbf{B}' = \chi_o \mathbf{B}_0 \quad (2.6)$$

Разделим на μ_0 выражение (2.6):

$$\mathbf{B}' / \mu_0 = \chi_o \mathbf{B}_0 / \mu_0$$

$$\text{Получим:} \quad \mathbf{H}' = \chi_o \mathbf{H}_0, \quad (2.7)$$

но \mathbf{H}' определяет намагниченность вещества I , т.е. $\mathbf{H}' = I$, тогда из (2.7):

$$I = \chi_o \mathbf{H}_0. \quad (2.8)$$

Таким образом, если вещество находится во внешнем магнитном поле с напряженностью \mathbf{H}_0 , то внутри него индукция определяется выражением:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}' = \mu_0 \mathbf{H}_0 + \mu_0 \mathbf{H}' = \mu_0 (\mathbf{H}_0 + I) \quad (2.9)$$

Последнее выражение строго справедливо, когда сердечник (вещество) находится полностью во внешнем однородном магнитном поле (замкнутый тор, бесконечно длинный соленоид и т.д.).

2.3 Магнитные свойства минералов

2.3.1 Классификация минералов по магнитным свойствам

Все вещества по магнитным свойствам классифицируют на три группы:

- ферромагнитные ($\chi_o = 1 - 10^4$);
- парамагнитные ($\chi_o > 0$)
- диамагнитные ($\chi_o < 0$)

Однако технологическая классификация минералов по магнитным свойствам отличается, так как магнитному обогащению подвергаются в основном ферромагнитные и частично парамагнитные минералы.

Технологическая классификация минералов производится по величине их *удельной магнитной восприимчивости* - χ .

$$\chi = -\chi_o / \delta \quad (2.10)$$

где δ - плотность вещества.

Размерность удельной магнитной восприимчивости - $\text{м}^3/\text{кг}$.

По величине удельной магнитной восприимчивости все минералы классифицируют также на три группы:

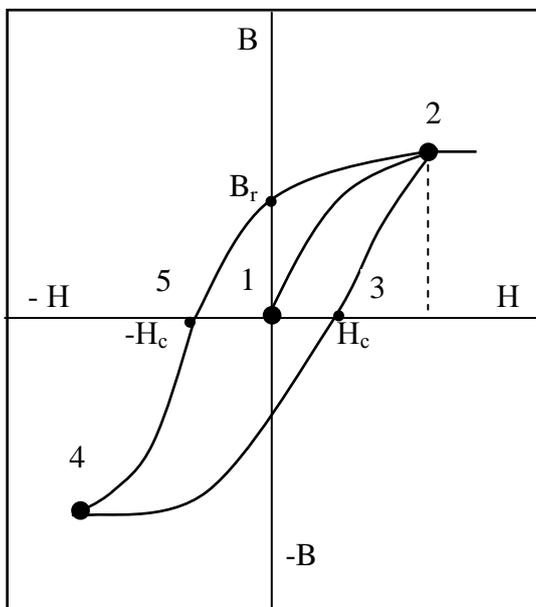
- ◆ сильномагнитные минералы (ферромагнитные) - $\chi > 3.8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$;
- ◆ слабомагнитные минералы - $.7.5 \cdot 10^{-6} < \chi < 3.8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$;
- ◆ немагнитные минералы $\chi < 1.26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$

К первой группе относятся: магнетит, пирротин, маггемит.

Ко второй - гематит, марганцевые руды, ильменит, вольфрамит, гранат и др.

2.3.2 Магнитные свойства сильномагнитных минералов.

Сильномагнитные минералы уникальны по своим магнитным свойствам. Наиболее важное из них - это **явление гистерезиса**. На рисунке в координатах "индукция" (В) и "напряженность поля" (Н) показана **петля гистерезиса**. При помещении сильномагнитного тела впервые в поле с напряженностью (Н) его намагничиваемость осуществляется по кривой 1-2 до насыщения тела (напряженность H_2)

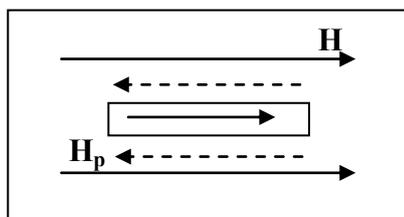


При снижении напряженности поля до 0 размагничивание тела осуществляется по кривой 2- B_r , а при изменении направления напряженности (-Н) индукция в теле изменяется по кривой 5-4. Обратный ход – по кривой 4-3-2.

На петле видно, что при $H=0$ (точка B_r) в теле присутствует индукция. Эта величина (B_r) называется **остаточной намагниченностью**. Для ее снятия необходимо приложить напряженность (- H_c), которая называется **коэрцитивной силой**. По величине данного параметра материалы классификация на магнитомягкие, ($H_c = 6-8 \text{ кА/м}$), и магнито жесткие, $H_c > 10 \text{ кА/м}$. Влияние на технологию данных показателей рассмотрено в разделе 2.6.

Зависимость магнитных свойств сильномагнитных минералов от формы частиц

На краях ферромагнитного поля, помещенного во внешнее магнитное поле, возникают магнитные полюса (см. схему). Они создают собственное поле с напряженностью H_p , направленное против внешнего поля H .



Это поле наз. **размагничивающим**.

Его напряженность пропорциональна коэффициенту размагничивания N :

$$H_p = NI \quad (2.11)$$

По этой причине напряженность поля, действительно намагничивающее тело, меньше внешнего:

$$H_e = H - H_p = H - NI \quad (2.12)$$

Коэффициент размагничивания N зависит не от размеров тела, а от их соотношения, т.е. от **формы тела**.

Для бесконечно длинного стержня, ось которого совпадает с направлением напряженности поля, $\mathbf{N} = \mathbf{0}$, для тонкого диска, расположенного перпендикулярно \mathbf{H} поля, $\mathbf{N} = \mathbf{1}$. Для шара $\mathbf{N} = \mathbf{0.33}$, для частиц магнетита, $\mathbf{N} = \mathbf{0.16}$.

На основании выражения (2.8) можно записать:

$$I = \chi_0 H_e \quad (2.13)$$

здесь χ_0 - объемная магнитная восприимчивость вещества.

С учетом (2.11 и 2.12) получим:

$$H_e = H - NI = H - N\chi_0 H_e \quad \text{Откуда:}$$

$$H_e(1 + N\chi_0) = H \quad \text{или} \quad H_e = \frac{1}{1 + N\chi_0} \cdot H$$

Подставив это выражение в (2.13), получим:

$$I = \frac{\chi_0}{1 + N\chi_0} \cdot H \quad (2.14)$$

Обозначим:

$$\chi_{om} = \frac{\chi_0}{1 + N\chi_0} \quad (2.15)$$

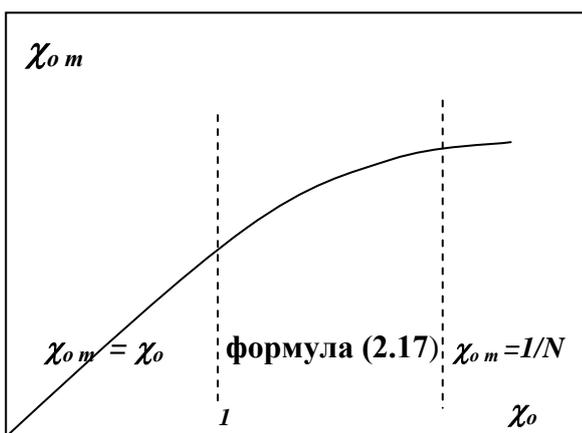
Здесь величина χ_{om} называется **объемной магнитной восприимчивостью тела**.

Соответственно, удельная магнитная восприимчивость тела равна

$$\chi_m = \chi_{om} / \delta \quad (2.16)$$

Величины χ_m и χ связаны соотношением:

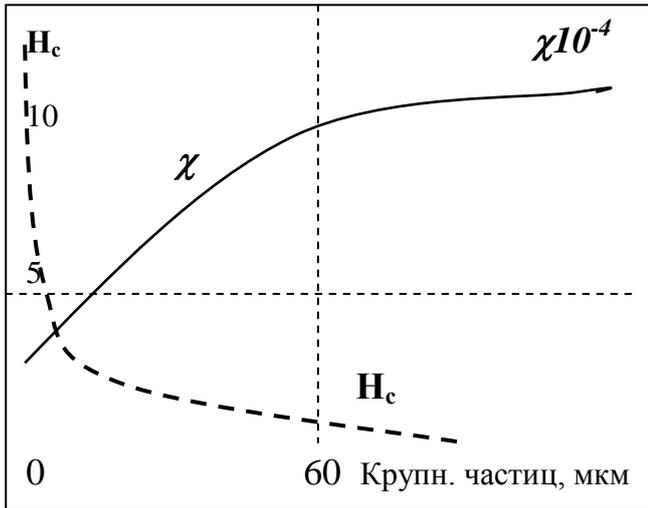
$$\chi_m = \frac{\chi_{om}}{\delta} = \frac{\chi_0}{\delta(1 + N\chi_0)} = \frac{\chi}{1 + N\delta\chi} \quad (2.17)$$



Анализируя выражение (2.17) можно сделать вывод, что для малых значений $\chi_0 < 1$ (слабомагнитные минералы) $\chi_{om} \Rightarrow \chi_0$, при больших значениях (сильномагнитные минералы) $\chi_{om} = 1/N$, т.е. в этом случае магнитная восприимчивость зависит в основном от формы частиц. Это иллюстрируется графиком, приведенном на рисунке.

Зависимость магнитной восприимчивости магнетита от крупности

Исследования показали, что с уменьшением крупности частиц магнетита (менее 74 мкм) коэрцитивная сила их возрастает, а удельная магнитная восприимчивость - падает (графики).

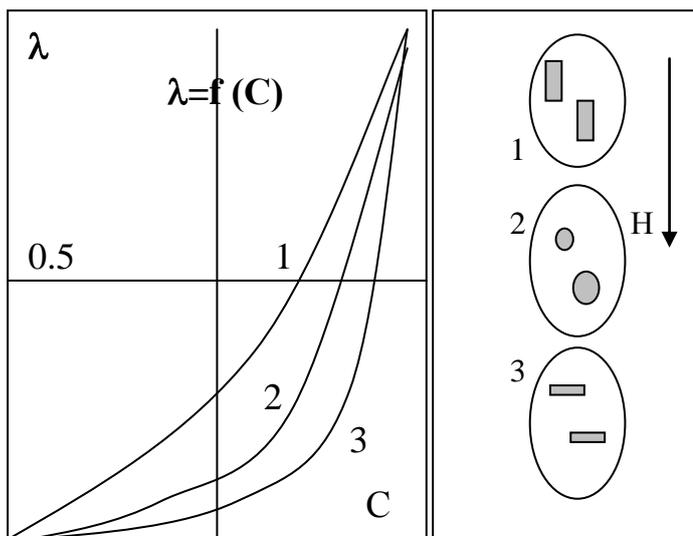


Снижение χ с уменьшением диаметра магнетита может служить причиной потерь тонких классов с хвостами магнитной сепарации. Однако, этому явлению препятствует магнитная флокуляция частиц и образование магнитных "прядей" из тонких частиц. При этом удельная магнитная восприимчивость пряди, как длинного тела, возрастает. Увеличение коэрцитивной силы тонких частиц благоприятствует образованию прядей.

2.4 Магнитные свойства сростков

Магнитная восприимчивость сростка магнетита с иным минералом зависит только от содержания в нем магнетита, так как его удельная магнитная восприимчивость в 80 - 100 раз больше, чем у других минералов.

Магнитные свойства сростков характеризуются относительной объемной магнитной восприимчивостью - λ .



магнитной восприимчивостью - λ .

$$\lambda = \chi_{o.ср.} / \chi_{o.м.}$$

Исследования показали, что зависимость λ от концентрации магнетита (C) определяется еще формой и расположением осей магнитных включений. (Рис)

Магнитные свойства сростков можно оценивать по выражению:

$$\lambda = 10^{-4} C^2,$$

где C - содержание магнетита в %.

2.5 Магнитные свойства слабомагнитных минералов

Магнитные свойства слабомагнитных минералов не зависят от формы частиц.

Магнитная восприимчивость слабомагнитных сростков определяется:

$$\chi_{ср} = \sum \gamma_i \chi_i, \quad (2.18)$$

где χ_i - уд. магнитная восприимчивость слабомагнитного i -го минерала;

γ_i - содержание в сростке i -го минерала в дол. единицы ($\sum \gamma_i = 1$)

2.6 Влияние магнитных свойств минералов на процесс магнитного обогащения.

Магнитная восприимчивость подлежащих извлечению в магнитную фракцию минералов определяет в основном тип применяемого сепаратора (с сильным либо слабым полем).

Мелкие частицы сильномагнитного магнетита в магнитном поле сепаратора ориентируются вдоль силовых линий и благодаря остаточной намагниченности образуют магнитные пряди. Удельная магнитная восприимчивость пряди, как длинного тела, выше, чем восприимчивость отдельных мелких частиц магнетита. Это способствует более глубокому извлечению тонких магнетитовых частиц. Однако, в момент образования пряди происходит захват и немагнитных частиц, т.е. происходит засорение магнитного продукта. Нужно принимать меры!

При магнитном обогащении магнетита важную роль играет **коэрцитивная сила и остаточная намагниченность**. Наличие этих свойств приводит к тому, что сильномагнитные частицы, прошедшие через магнитное поле сепаратора, сохраняют намагниченность и при выходе из этого поля. Это приводит к образованию **магнитных флокул**. Данный процесс оказывает положительное влияние при операциях сгущения, обесшламливания и обезвоживания. Отрицательное влияние - при мокрой классификации по крупности. В этом случае мелкие и крупные частицы магнетита образуют агрегаты, классификация по крупности нарушается.

Следовательно, необходимо предусматривать операции намагничивания и размагничивания.

2.7 Магнитная сила, действующая на частицы в магнитном поле.

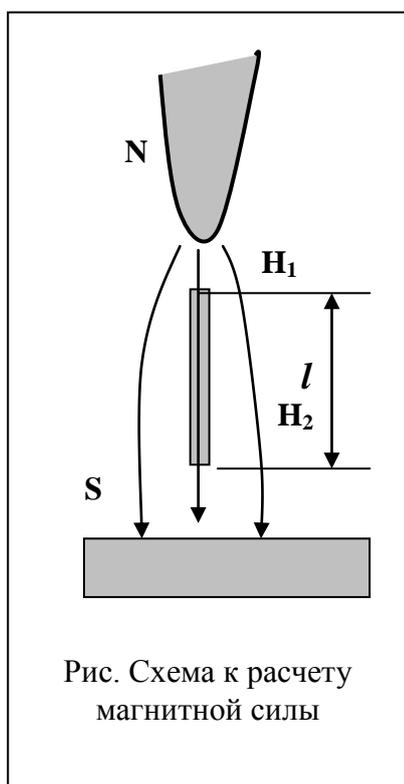


Рис. Схема к расчету магнитной силы

Пусть в неоднородном магнитном поле расположена частица длиной l и магнитной массой $-m$ (рисунок)

Магнитная сила, действующая на частицу, будет равна:

$$f_{\text{маг}} = \mu_0 m(H_1 - H_2), \quad (2.19)$$

Поле неоднородно, поэтому можно записать:

$$H_2 = H_1 - l \, dH/dx \quad (2.20)$$

Имеем $f_{\text{маг}} = \mu_0 m(H_1 - H_1 + l \, dH/dx) = \mu_0 ml \, dH/dx$.

Но $ml = P_m$ - это магнитный момент, который можно представить: $ml = P_m = IV$,

где I - намагниченность частицы,

V - объем частицы.

Ранее было: $I = \chi_0 H$.

Тогда: $f_{\text{маг}} = \mu_0 IV \, dH/dx = \mu_0 \chi_0 H V \, dH/dx \quad (2.21)$

Представим удельную силу $F_m = f_{\text{маг}}/Q$,

где $Q = V\delta$ - масса частицы.

Получим $F_m = (\mu_0 \chi_0 H V dH/dx)/V\delta$,

учитывая, что $\chi_0/\delta = \chi$, имеем:

$$F_m = \mu_0 \chi H \text{grad}H \quad (2.22)$$

Можно представить выражение (2.22) в другом виде:

$dH/dx = cH = \text{grad}H$, где c - коэффициент неоднородности поля, тогда:

$$F_m = \mu_0 \chi c H^2 \quad (2.23)$$

2.8 Явление равнопритягиваемости

Магнитное поле в рабочем зазоре сепаратора весьма неоднородно. При подаче в сепаратор руды с широким диапазоном крупности может оказаться, что магнитная сила, действующая на частицы наибольшего и наименьшего диаметра, будет различна. Следовательно, если при сепарации в режиме извлечения создать магнитную силу, достаточную для притяжения самого мелкого зерна, находящегося в самом низу зоны, то с такой же силой, а может еще большей, будут притягиваться и крупные частицы, расположенные ближе к поверхности полюса, хотя и магнитные свойства у них ниже, например сростки. Происходит засорение концентрата.

Это явление, когда частицы разного диаметра и с различной магнитной восприимчивостью притягиваются с одинаковой магнитной силой, наз **равнопритягиваемостью**.

Отношение диаметров двух минералов с различными магнитными восприимчивостями притягивающихся с одинаковой магнитной силой наз. **коэффициентом равнопритягиваемости**:

$$K_p = D/d$$

Условие удельной равнопритягиваемости частиц можно выразить:

$$\chi_1 (H \text{grad}H)_1 = \chi_2 (H \text{grad}H)_2 \quad (2.24)$$

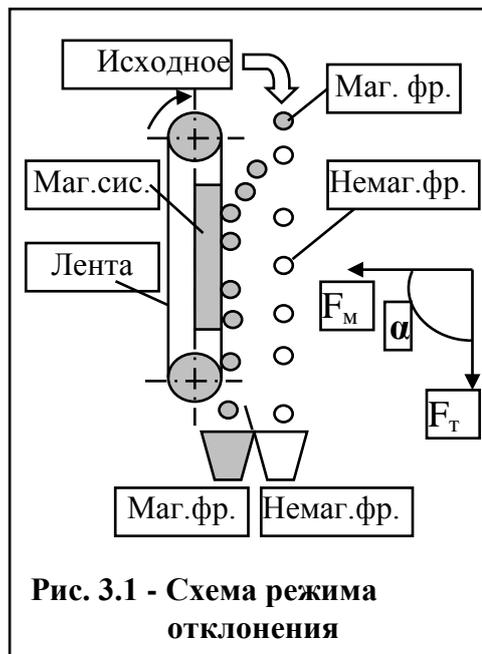
Меры борьбы с этим явлением применение изодинамического магнитного поля, где $H \text{grad}H = \text{const}$ или обогащать узкими классами крупности, предварительно классифицируя исходную руду на классы крупности.

3 МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ СЕПАРАТОРОВ

3.1 Способы магнитной сепарации

Разделение минералов в магнитном поле может осуществляться следующими способами (режимами):

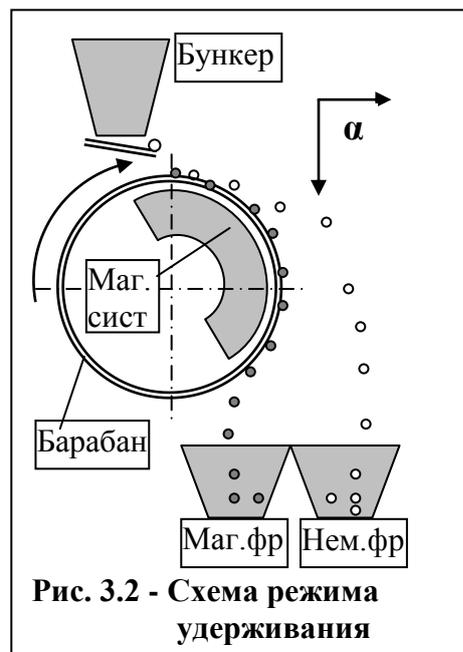
- ◆ отклонение магнитной фракции;
- ◆ удерживание магнитной фракции;
- ◆ извлечение магнитной фракции.



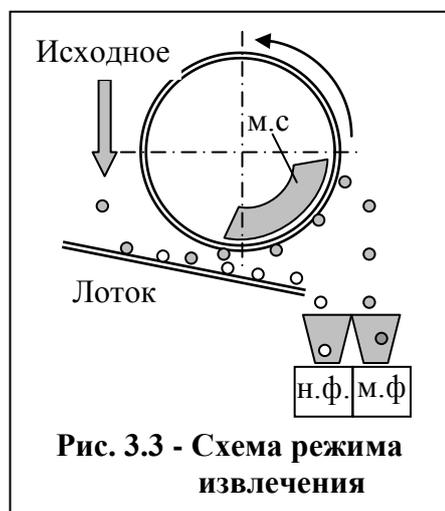
Режим отклонения (Рис. 3.1) "в чистом виде" применяется редко, он малоэффективен, малопродуктивен.

Однако данный режим частично имеет место в других режимах сепарации.

Угол (α) между конкурирующими силами называется углом раскрытия веера продуктов, α до 90° .



Режим удерживания (подача материала сверху), (рис. 3.2) - магнитная фракция удерживается на рабочем органе сепаратора (барабане), немагнитная сбрасывается центробежной силой с его поверхности. Характеризуется большой производительностью, высоким извлечением, но малой селективностью. Причина - из внутреннего слоя материала немагнитные частицы с трудом сбрасываются с поверхности барабана. Угол раскрытия веера продуктов - до 90° . Применяется обычно при сухой сепарации сильномагнитных минералов.



Режим извлечения (подача материала снизу, рис. 3.3.) - магнитная фракция извлекается из материала, проходящего под рабочим органом сепаратора.

Способ включает режимы отклонения и удерживания. Характеризуется высокой селективностью, но меньшей производительностью. Применяется при сухой и мокрой сепарации измельченных руд. Основным режимом обогащения магнетитовых руд в водной среде.

Угол раскрытия веера продуктов - до 90° , при мокром обогащении - до 180°

3.2 Общая характеристика полей сепараторов

Известно, что магнитная восприимчивость сильномагнитных минералов в 150 - 200 раз выше, чем у слабомагнитных. Следовательно, для извлечения слабомагнитных минералов требуется магнитная сила во столько же раз большая. Учитывая, что $F_{\text{маг}} = cH^2$, следует, что напряженность поля сепараторов для обогащения слабомагнитных руд должна быть в 10 - 15 раз выше напряженности сепараторов,

обогащающих сильномагнитные руды. Промышленность выпускает сепараторы со слабым полем ($H = 80 - 120$ кА/м) и с сильным полем ($H = 800 - 1600$ кА/м).

В сепараторах со слабым полем применяют **открытые** магнитные системы, с сильным полем - **замкнутые** (закрытые) магнитные системы. Последние позволяют получать поля с высокой напряженностью.

В сепараторах имеется **рабочая зона** - это участок магнитного поля, где происходит притяжение магнитных частиц и их удерживание вблизи полюсов магнитной системы.

Рабочая зона характеризуется **длиной (L), и высотой (глубиной) (h)**.

Длина рабочей зоны определяется расстоянием от участка, где начинается притяжение магнитных частиц, до участка, где заканчивается разгрузка немагнитных частиц.

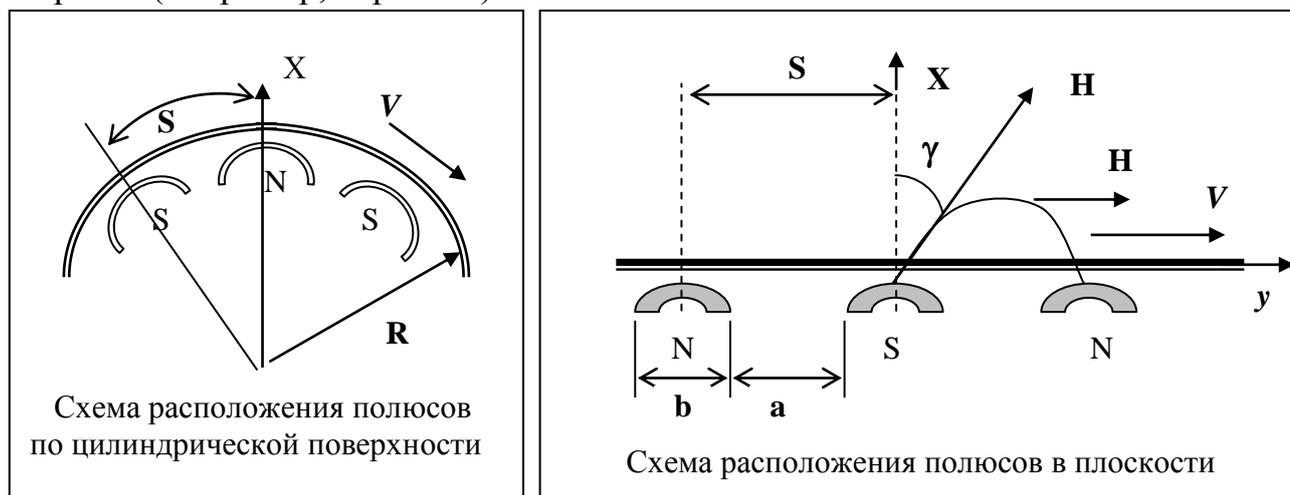
Высота рабочей зоны - это расстояние от поверхности полюсов до участка, где магнитная сила уже не обеспечивает удерживание (или извлечение) магнитных частиц с требуемой магнитной восприимчивостью.

Сепараторы со слабым полем имеют рабочую зону с большей длиной и высотой, могут обогащаться руды крупностью до 150 мм, сепараторы с сильным полем имеют малый объем рабочей зоны, крупность обогащаемого материала ограничивается диаметров 5 - 6 мм.

3.3 Открытые магнитные системы (ОМС)

3.3.1 Основное уравнение напряженности поля ОМС

Сепараторы с открытыми магнитными системами - это **многополюсные** системы. Магнитные полюса могут располагаться по цилиндрической поверхности или в плоскости. В свою очередь, полюса могут чередоваться по периметру рабочего органа (например, барабана) или по оси.



На характеристики магнитного поля многополюсных систем кроме магнитодвижущей силы (Ампер-витки) оказывает влияние:

- **S**- шаг полюсов;
- **R** - радиус рабочего органа;
- отношение ширины полюса (**b**) к ширине паза (**a**);
- форма полюсов.

Сочнев А.Я. представил основное уравнение магнитного поля системой в частных производных. Возьмем одно из них за основу:

$$\frac{\partial(\ln H)}{\partial x} + \frac{\partial \gamma}{\partial y} = 0, \quad (3.1)$$

где γ - угол между осью X вектором напряженности (H) по часовой стрелке.

Закрепим начало координат в средней точке одного из полюсов (рис). Перепишем уравнение (3.1) в виде:

$$\partial(\ln H) = -\frac{\partial \gamma}{\partial y} \cdot \partial x \quad (3.2)$$

$$\text{Обозначим } \frac{\partial \gamma}{\partial y} = C \quad (3.3)$$

$$\text{Тогда: } \partial(\ln H) = -C \partial X, \quad \text{откуда } \ln H = -CX + C_1, \quad (3.4)$$

где C_1 - постоянная интегрирования.

Составим начальные условия (следуют из рисунка):

$$\left\{ \begin{array}{l} X=0, \quad H=H_0 \quad - \text{напряженность на поверхности полюса,} \\ y=0, \quad \gamma=0 \\ y=0.5S, \quad \gamma=\pi/2 \end{array} \right.$$

$$\text{При } X=0, \quad \ln H_0 - C \cdot 0 + C_1, \quad \text{следовательно } C_1 = \ln H_0 \quad (3.5)$$

Подставим (3.5) в (3.4):

$$\ln H = -CX + \ln H_0$$

Перепишем последнее выражение:

$$\ln(H/H_0) = -CX \quad (3.6)$$

Пропотенцируем выражение (3.6):

$$H = H_0 e^{-cx} \quad (3.7)$$

Выражение (3.7) - общий вид основного уравнения магнитного поля.

Здесь C - коэффициент неоднородности поля.

Продолжим использовать уравнение Сочнева. Из (3.3) следует:

$$\partial \gamma = C \partial y, \quad \text{откуда } \gamma = Cy + C_2, \quad (3.8)$$

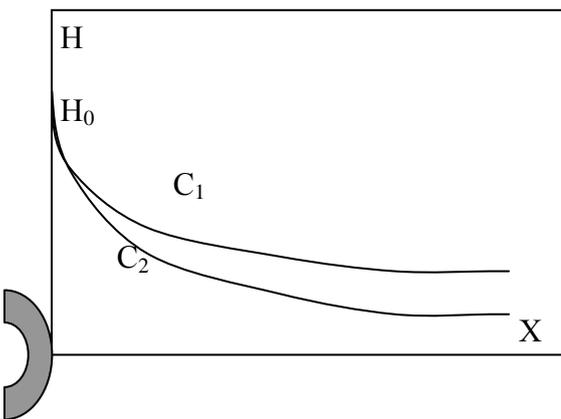
где C_2 - постоянная интегрирования.

Определим ее из начальных условий:

$$\text{При } y=0, \quad \gamma=0 \quad \text{имеем } C_2 = 0$$

Из начальных условий: при $y=0.5S, \quad \gamma=\pi/2$ и выражения (3.8) имеем:

$$\gamma = \pi/2 = C \cdot 0.5S + 0,$$



откуда $C = \pi/S$ (3.9) и $\gamma = \pi y/S$ (3.10)
 Теперь выражение (3.7) имеет вид (с учетом 3.9):

$$H = H_0 \cdot e^{-\frac{\pi}{S}x} \quad (3.11)$$

Определим проекции напряженности H на оси X и Y , с учетом (3.10 и 3.11):

На ось X :
$$H_x = H \cdot \cos \gamma = H_0 e^{-\frac{\pi}{S}x} \cdot \cos \gamma = H_0 e^{-\frac{\pi}{S}x} \cos \frac{\pi}{S}y \quad (3.12)$$

На ось Y :
$$H_y = H \sin \gamma = H_0 e^{-\frac{\pi}{S}x} \sin \gamma = H_0 e^{-\frac{\pi}{S}x} \sin \frac{\pi}{S}y \quad (3.13)$$

Таким образом, полное основное уравнение напряженности поля имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} H_x &= H_0 e^{-\frac{\pi}{S}x} \cos \frac{\pi}{S}y \\ H_y &= H_0 e^{-\frac{\pi}{S}x} \sin \frac{\pi}{S}y \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

Анализ системы (14) приводит к заключению:

- в плоскости симметрии полюсов, где $\gamma = 0$; $H_y = 0$; $H_x = H_0 e^{-\frac{\pi}{S}x}$;
- в плоскости, проходящей через середину межполюсного зазора:

$$\gamma = \pi/2: \quad H_x = 0; \quad H_y = H_0 e^{-\frac{\pi}{S}x}.$$

У поверхности полюсов, где $X=0$:

$$\left. \begin{aligned} H_x &= H_0 \cos \frac{\pi}{S}y \\ H_y &= H_0 \sin \frac{\pi}{S}y \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

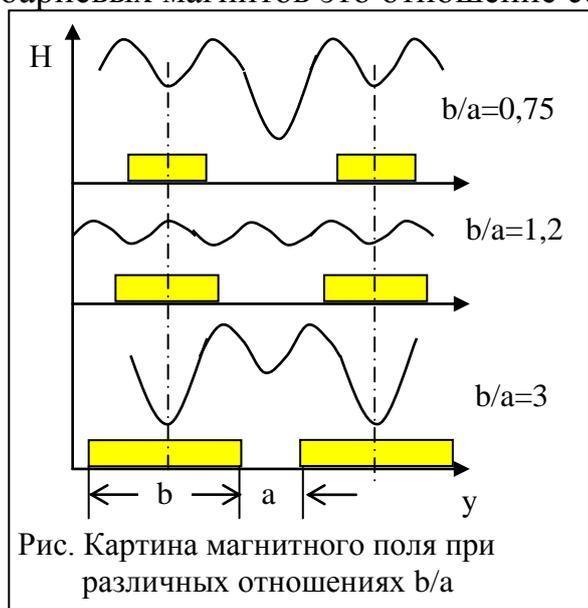
Если полюса расположены по цилиндрической поверхности, то коэффициент неоднородности поля представляется выражением (следует из теории размерности):

$$C = \frac{\pi}{S} + \frac{1}{R}, \quad (3.16),$$

где R - радиус барабана

Большое влияние на картину магнитного поля многополюсной системы оказывает влияние отношение ширины полюса к ширине межполюсного зазора (b/a)

Для литых постоянных магнитов (Рис) только при $b/a = 1.2$ напряженности поля на поверхности барабана напротив середины полюса и середины межполюсного зазора равны между собой. Это ценно для работы сепаратора. Для ферритобариевых магнитов это отношение составляет $4:1$.

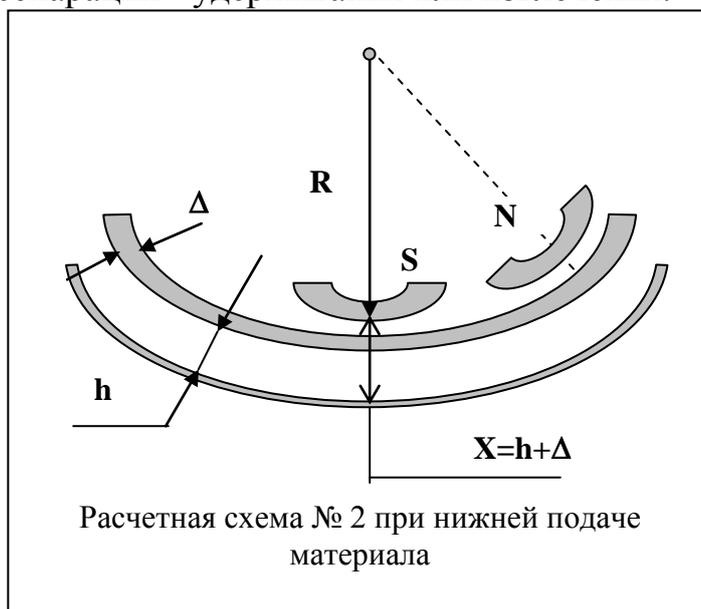
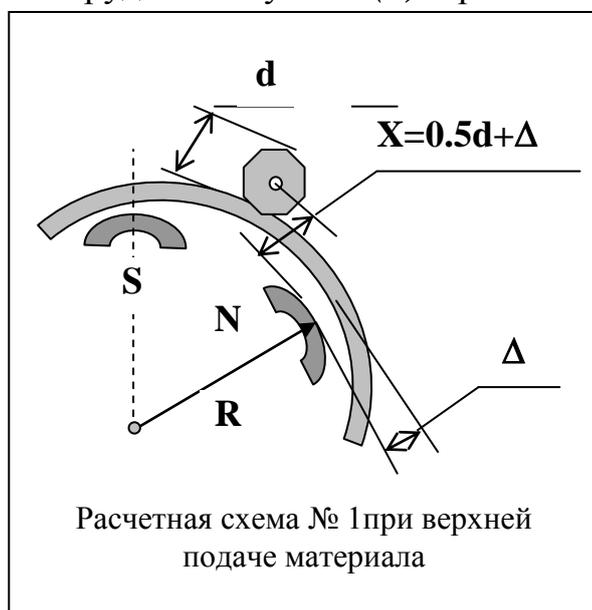


По мере удаления от поверхности полюсов эта разность сглаживается. Но по мере удаления от поверхности полюсов сила магнитного поля $H_{grad}H$ резко падает. Расчеты показывают, что магнитная сила на расстоянии $X=S/2$ падает в 23 раза по сравнению с H_0 , а на расстоянии $X=S$ - в 525 раз.

Поэтому выбор оптимального шага полюсов - важная задача.

3.3.2 Оптимальный шаг полюсов магнитной системы

Оптимальный шаг полюсов определяется крупностью руды (d), высотой слоя руды или пульпы (h) и режимом сепарации - удерживания или извлечения.



При обогащении кусковой руды на барабанном сепараторе в режиме удерживания (схема 1) необходимо иметь магнитную силу, достаточную для удерживания магнитных кусков руды на расстоянии $X=0.5d + \Delta$, а в режиме извлечения (схема 2) - достаточную для извлечения частиц с глубины, равной $X=h + \Delta$.

Удельная магнитная сила, действующая на расстоянии X от полюсов, может быть представлена (с учетом выражения 2.7):

$$F_{\text{маг}} = \mu_0 \chi H \text{grad} H = \mu_0 \chi H_0 e^{-cx} \text{grad} H$$

Ранее было: $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{-cx}$; $\text{grad} H = C H$, тогда следует:

$$F_{\text{маг}} = \mu_0 \chi C H_0^2 e^{-2cx} \quad (3.17)$$

Здесь значение "X" - из схем: $\mathbf{X} = 0.5\mathbf{d} + \Delta$ или $\mathbf{X} = \mathbf{h} + \Delta$.

Отметим, что оптимальный шаг полюсов (S) должен обеспечивать максимальную магнитную силу и что он входит в значение "C". Значит, следует исследовать выражение (3.17) на максимум в зависимости от "C", т.е. взять производную dF/dC и приравняв ее "0", найти значение "C".

Производную берем как функцию произведения, получим:

$$\frac{dF_m}{dC} = \mu_0 \chi H_0^2 \left[1 \cdot e^{-2cx} + C(-2x)e^{-2cx} \right] = 0$$

$$\frac{dF_m}{dC} = \mu_0 \chi H_0^2 e^{-2cx} (1 - 2CX)$$

Чтобы производная была равна "0", нужно выполнение условия:

$$1 - 2CX = 0,$$

Тогда $C = 1/2X$,

для первого случая следует $C = 1/(d+2\Delta)$ (3.18)

для второго - $C = 1/(2(h + \Delta))$ (3.19)

При расположении полюсов в плоскости имеем ($C = \pi/S$):

$\pi/S = 1/(d+2\Delta)$, откуда $S = \pi(d+2\Delta)$ (3.20) - в режиме *удерживания*.

$\pi/S = 1/(2(h + \Delta))$, $S = 2\pi(h + \Delta)$ (3.21) - в режиме *извлечения*

При расположении полюсов по цилиндрической поверхности, когда

$C = \pi/S + 1/R$, имеем:

$$S = \frac{\pi R(d+2\Delta)}{R-(d+2\Delta)} \quad (3.22) \quad \text{в режиме удерживания}$$

$$S = \frac{2\pi R(h+\Delta)}{R-2(h+\Delta)} \quad (3.23) \quad \text{в режиме извлечения}$$

3.3.3 Влияние шага полюсов на технологические показатели процесса сепарации

Практика магнитного обогащения магнетитовой руды показала, что при сухой сепарации мелкой руды с верхней подачей с уменьшением шага полюсов растет содержание железа в концентрате и снижается в хвостах.

При мокрой сепарации картина обратная. (Рисунки)

Проанализируем показанную зависимость.

Концентрат. Приведенная зависимость объясняется поведением магнитных прядей в рабочей зоне. При перемещении прядей относительно чередующихся полюсов происходит их перемешивание, (вращение), что способствует очистке концентрата.

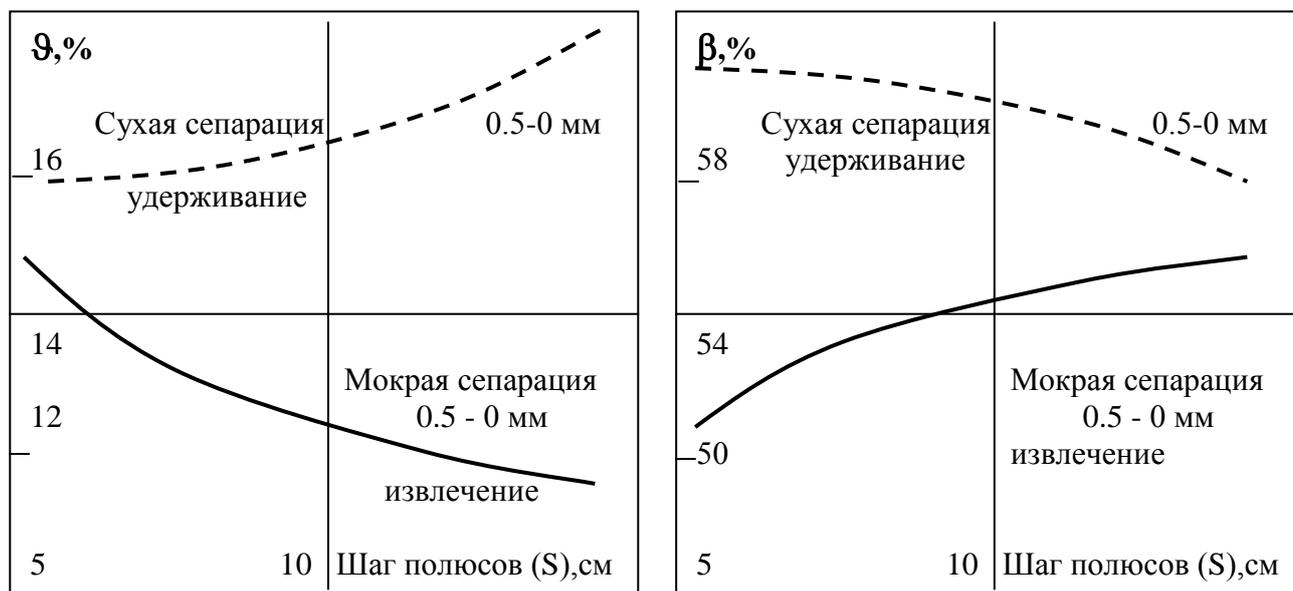


Рис. Зависимость содержания железа в хвостах (α) и в концентрате (β) от шага полюсов S

При одной и той же длине рабочей зоны сепаратора число полюсов возрастает с уменьшением шага полюсов. Следовательно, растет частота колебаний прядей, что повышает качество концентрата (1-й фактор).

С другой стороны, с уменьшением шага полюсов снижается длина пряди, прочность (жесткость) ее растет, что затрудняет вымывание из прядей немагнитных частиц при мокром обогащении (2-й фактор). Очевидно, **при сухой сепарации определяющим является первый фактор, при мокрой - второй.**

Хвосты. Уменьшение содержания железа в хвостах со снижением шага полюсов *при сухой сепарации* - следствие того, что в этом режиме мелкая руда поступает непосредственно на поверхность барабана, где H_{gradH} выше при малом шаге полюсов. При *мокрой же сепарации* (режим извлечения) материал поступает под барабан, т.е. извлечение должно производиться с большей глубины. Здесь большее значение H_{gradH} достигается при увеличении шага полюсов.

Таким образом, оптимальный шаг полюсов определяется режимом сепарации, диаметром обогащаемого материала, отношением ширины полюса к межполюсному зазору, диаметром расположения магнитных полюсов.

Для расчета подобных систем применяют специальные математические методы, например, конформное отображение.

3.3.4 Бегущее магнитное поле открытых магнитных систем.

Бегущее магнитное поле может создаваться двумя способами: обмоткой трехфазного переменного тока и относительным перемещением материала (с барабаном, лентой) и чередующихся полюсов.

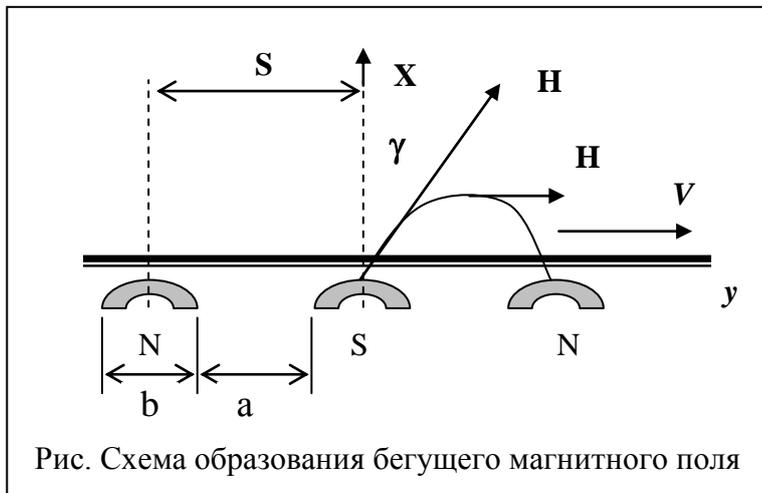
В первом случае бегущее поле образуется за счет трех синусоидальных однофазных полей, сдвинутых относительно друг друга на 120° . В этом случае при неподвижном рабочем органе, например, барабане магнитное поле как бы перемещается. Напряженность поля, создаваемого трехфазным током описывается выражением:

$$\left. \begin{aligned} H_x &= H_0 e^{-cx} \cos \omega t \\ H_y &= H_0 e^{-cx} \sin \omega t, \end{aligned} \right\}$$

где ω - угловая частота переменного тока.

Сепараторы с подобными магнитными системами не получили распространение из-за низкой производительности и низкого $\cos \phi$ системы.

Во втором случае синусоидальное магнитное поле образуется при перемещении барабана с материалом относительно неподвижной многополюсной магнитной системы. Полюса при этом чередуются по направлению движения материала.



Из рисунка видно, что при перемещении точки с лентой на расстояние $l=2S$ угол γ вектора напряженности будет изменяться в этой точке от 0 до 2π .

Очевидно, частота этого поля составит:

$$f = V/2S \quad (3.24)$$

Учитывая, что в данном случае $y = Vt$ основное уравнение магнитного поля примет вид:

$$\left. \begin{aligned} H_x &= H_0 e^{-\frac{\pi}{s}x} \cos \frac{\pi}{s}vt \\ H_y &= H_0 e^{-\frac{\pi}{s}x} \sin \frac{\pi}{s}vt \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Обе составляющие напряженности имеют характер поступательного волнового движения со скоростью V . Частота колебания поля определяется скоростью вращения барабана и шагом полюсов.

Частота бегущего магнитного поля оказывает значительное влияние на эффективность обогащения, как в воздушной среде, так и в водной.

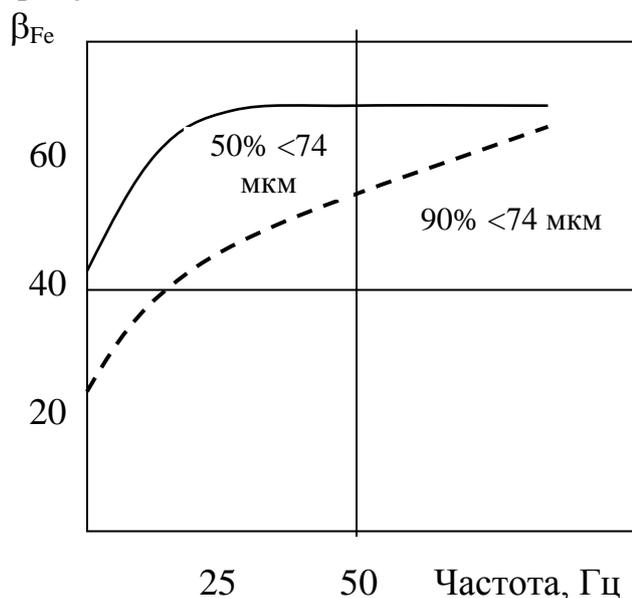
При сухой магнитной сепарации в режиме удерживания эффективность обогащения связана с частотой магнитного поля эмпирическим выражением:

$$\eta = \eta_0 + k\sqrt{f}, \quad (3.26)$$

где η_0 – эффективность сепарации при $f = 0$;

k – опытный коэффициент.

Влияние частоты поля на качество магнитного концентрата иллюстрируется на рисунке.



Данные выводы нельзя распространять на все способы сепарации. Методы расчета оптимальной частоты не разработаны. Практика показывает, что при мокром обогащении она должна быть значительно меньшей, чем при сухой сепарации и составляет единицы Герц. Замечено также, что изменение частоты при мокрой сепарации существенно влияет лишь до определенной крупности материала, ниже которой магнитные пряди не переориентируются, а лишь перемаг-

ничиваются. При мокрой сепарации магнитожесткого магнетита ($H_c > 10$ кА) переориентация прядей может нанести и вред. Если оторвавшиеся от поверхности барабана прядь окажется сориентирована одноименным полюсом к полюсу магнитной системы, она может быть вытолкнута энергией гистерезисного цикла из рабочей зоны сепаратора. Это может происходить, если $H_c > 2H$.

3.4 Характеристика магнитных полей замкнутых систем

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

На рис. показано сочетание полюсов:

- а) плоский - гиперболический;
- б) – 2 гиперболических полюса;
- в) вогнутый – клинообразный (закругленный);
- г) плоский – многозубчатый;
- д) желобчатый – многозубчатый.

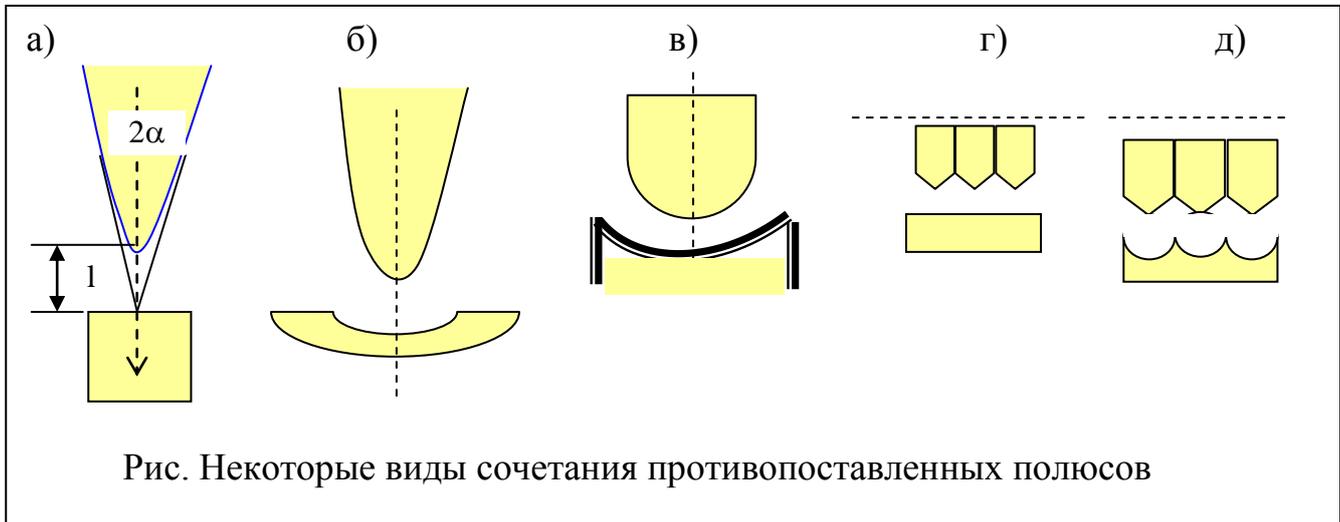


Рис. Некоторые виды сочетания противопоставленных полюсов

Теоретическое определение напряженности магнитного поля в зазорах, образованных различным сочетанием полюсов затруднено. Наиболее простое выражение для сочетания полюсов плоский – гиперболический получено А. Сочневым. Оно имеет вид:

$$H_x = \frac{H_0 L \sin \alpha}{\sqrt{L^2 - (L - x)^2 \cos^2 \alpha}}, \quad (3.27)$$

где H_x – напряженность на расстоянии "x" от поверхности гиперболического полюса;

H_x - напряженность на расстоянии "x = 0";

L – расстояние между полюсами;

α - половина угла между асимптотами гиперболического полюса.

Из выражения видно, что при $X=L$ напряженность поля (на поверхности плоского полюса) равна:

$$H_L = H_0 \sin \alpha,$$

откуда следует: $(H_{gradH})_{x=L} = 0. \quad (3.28)$

Следовательно, магнитная сила на поверхности плоского полюса в этом случае равно 0.

В случае сочетания полюсов, как показано на рис. б $(H_{gradH})_{x=L}$ не равно 0.

Сочетание полюсов типа в) обеспечивает изодинамическое поле, где $(H_{gradH}) = \text{const}$ и оценивается:

$$H_{gradH} = \frac{H_o^2}{2L} \quad (3.29)$$

Сочетание с многозубчатым полюсом получили наибольшее распространение в сепараторах с сильным полем для обогащения слабомагнитных руд. При этом форма зубьев может быть различной: треугольная, трапециидальная, закругленная, прямоугольная. Чаще применяют треугольную форму зубьев с закругленным углом (45°) при вершине. Это снижает вероятность магнитного насыщения вершины зуба.

Напряженность поля между полюсами подобного сочетания зависит от расстояния между полюсами, формы и шага зубьев.

Расстояния между полюсами выбирается в зависимости от крупности руды, ее магнитных свойств, толщины слоя материала в рабочей зоне. Это расстояние должно быть таким, чтобы обеспечить условия для разделения поступающего слоя материала на два потока, не мешающих друг другу при движении. Высота рабочего зазора устанавливается опытным путем. При разделении крупнозернистого материала она должна быть не менее $(3 - 4)d_{\max}$, мелкозернистого $(15 - 20)d_{\max}$ и при тонкозернистом материале $(100 - 150)d_{\max}$, здесь d_{\max} – максимальный размер зерна питания.

4 ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ РУДЫ И ПУЛЬПЫ В МАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРАХ

При перемещении в магнитном поле сепаратора частицы минерала подвергаются воздействию как магнитной, так и конкурирующих механических сил. Векторная сумма указанных сил и предопределяет направление движение частицы – к поверхности магнитной системы, либо от нее. Можно представить условие разделения минералов по магнитным свойствам следующей системой:

$$\begin{cases} f'_{\text{маг}} \geq f'_{\text{мех}} \\ f''_{\text{маг}} \leq f''_{\text{мех}} \end{cases} \quad (4.1)$$

Здесь $f'_{\text{мех}}$ и $f''_{\text{мех}}$ – равнодействующие всех механических сил.

Первое выражение системы (4.1) должно выполняться для частиц, выделяемых в магнитный продукт, второе – для частиц, выделяемых в немагнитный продукт.

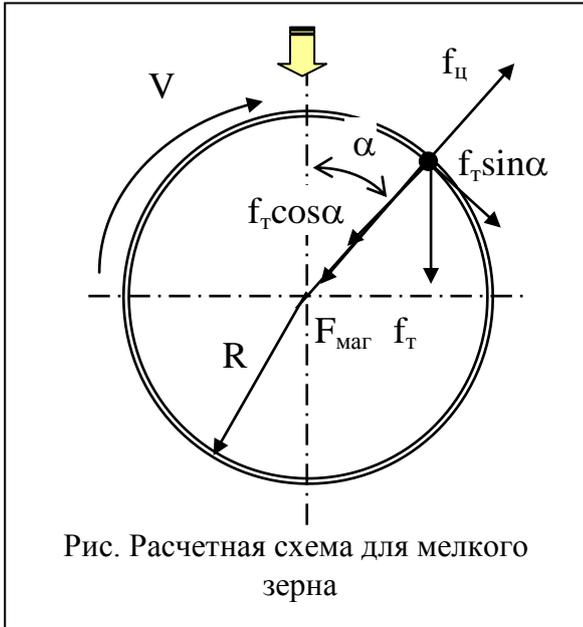
При обогащении в водной среде к конкурирующим силам следует отнести и гидравлические силы сопротивления.

По характеру перемещения руды или пульпы через рабочую зону все сепараторы подразделяются на аппараты с верхней подачей и криволинейным перемещением материала и сепараторы с нижней подачей с прямолинейным или криволинейным перемещением материала. К первым относятся барабанные, валковые, роликовые сепараторы, ко вторым – ленточные, дисковые, роторные, а также барабанные и валковые.

4.1 Динамика движение мелких частиц в сепараторах с верхней подачей материала (сухое обогащение)

Исходная руда подается сверху на поверхность рабочего органа (барабан или валок) и перемещается им через рабочую зону сепаратора (см. рис.).

При определенном угле отрыва ($\beta = \alpha$) немагнитная фракция под действием равнодействующей механической силы отрывается от поверхности барабана.



Магнитные же частицы, притянувшись к барабану, выносятся им из рабочей зоны. Таким образом, траектории движения магнитных и немагнитных частиц становятся различными.

Расчет действующих сил приводится в удельном виде, т.е. масса зерна принимается равной 1 ($m = 1$).

При криволинейном движении на частицу, помещенную на поверхность барабана, действуют следующие силы:

$F_{\text{маг}} = \mu_0 \chi H \text{grad} H$ – удельная магнитная сила;

$f_m = g$ – удельная сила тяжести, имеющая две составляющие:

$f_{mn} = g \cos \alpha$ – нормальная и $f_{mk} = g \sin \alpha$ – касательная составляющие;

$f_u = V^2/R$ – удельная центробежная сила.

Здесь V – окружная скорость барабана, R – радиус барабана.

Таким образом, механическая сила, действующая по направлению магнитной силы равна:

$$F_{\text{мех}} = f_u - f_{mn} = V^2/R - g \cos \alpha \quad (4.2)$$

Следовательно, удельная магнитная сила, необходимая для удерживания магнитного зерна на поверхности барабана, должна соответствовать условию:

$$F_{\text{маг}} \geq V^2/R - g \cos \alpha \quad (4.3)$$

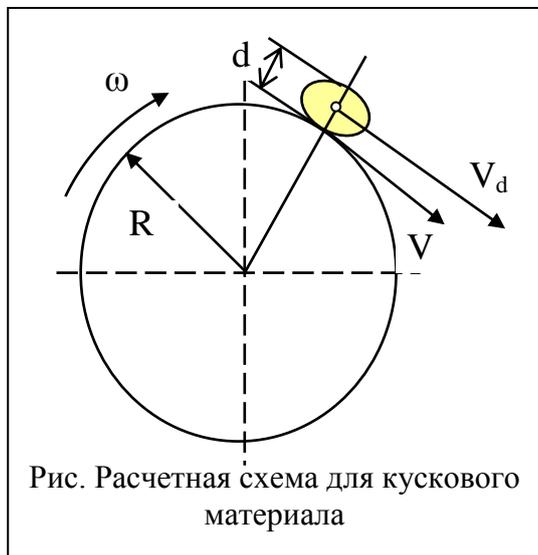
При рассмотрении движения единичной частицы следовало бы учесть и касательную составляющую силы тяжести, которая способна вызвать скольжение зерна и, как следствие, появление добавочной центробежной силы. Однако, на практике, когда на поверхности барабана находится не одно зерно, а слой материала, это явление маловероятно.

Кроме того, при расположении на барабане слоя материала из-за трения между сильномагнитными и немагнитными частицами затрудняется отделение последних от поверхности барабана, причем тем в большей степени, чем выше содержание сильномагнитных минералов (магнетита) – α_m . Это обстоятельство требует некоторого снижения удельной магнитной силы, которое учитывается коэффициентом $b = 1 + \alpha_m$, вводимым в знаменатель выражения (4.3). Таким образом, окончательное условие удерживания магнитных частиц на барабане имеет вид:

$$F_{\text{маг}} \geq \frac{1}{1 + \alpha_m} \left(\frac{V^2}{R} - g \cos \alpha \right). \quad (4.4)$$

4.2 Динамика движение крупной руды в сепараторах с верхней подачей материала

При анализе динамики движения кускового материала следует учесть размер магнитного куска, удерживаемого на поверхности барабана, так как центр тяжести куска расположен от центра вращения барабана на расстоянии более чем R .



Из рисунка следует:

$$\omega = V/R; \quad V_d = \omega(R+0,5d)$$

$$V_d = V(R+0,5d)/R,$$

Тогда, с учетом (4.4) окончательно получим:

$$F_{\text{маг}} \geq \frac{1}{1 + \alpha_m} \left[\frac{V^2 (R + 0.5d)^2}{R^3} - g \cdot \cos \alpha \right] \quad (4.5)$$

Из выражения (4.5) можно определить угол отрыва ($\alpha = \beta$) немагнитных кусков от поверхности барабана. Учитывая, что здесь $F_M = 0$, имеем:

$$\frac{V^2 (R + 0.5d)^2}{R^3} = g \cos \alpha, \text{ откуда следует:}$$

$$\beta = \arccos \frac{V^2 (R + 0.5d)^2}{R^3 \cdot g} \quad (4.6)$$

Из выражения (4.6) видно, что при увеличении скорости вращения барабана угол отрыва немагнитной фракции уменьшается, т.е. зона отделения немагнитных отходов отодвигается вверх от зоны отделения магнитной фракции, что должно повышать селективность разделения. При этом вначале отделяются крупные куски, затем мелкие. Для мелкозернистого материала (d – не учитывается) из (4.6):

$$\beta = \arccos \frac{V^2}{R \cdot g} \quad (4.7)$$

Из выражения (4.5) можно определить максимально допустимую окружную скорость барабана:

$$V_{\text{дон}} = \frac{R}{R + 0.5d} \sqrt{R[(1 + \alpha_b)F_{\text{маг}} + g \cos \alpha]} \quad (4.8)$$

Формула (4.8) – рабочая, позволяет, задавшись углом отрыва $\beta = \alpha$ для нужного слабомагнитного (немагнитного) минерала с известной магнитной восприимчивостью χ , для сепаратора с известным параметром $H_{\text{градH}}$ определить скорость барабана, при которой немагнитная фракция будет сброшена с поверхности рабочего органа при заданном угле отрыва. Обычно принимают угол отрыва немагнитной фракции $\beta = 90^\circ$.

Особенностью рассмотренного режима удерживания является то, что притяжение магнитных частиц происходит при максимальном значении магнитной силы, чем обеспечивается интенсивное извлечение их уже в начале рабочей зоны.

4.3 Динамика движения частиц при сепарации в водной среде

При мокром обогащении материала на процесс разделения частиц оказывает влияние сопротивление среды, которое особенно существенно для тонких частиц. Сопротивление среды снижает скорость перемещения магнитных частиц в направлении действия магнитной силы, а немагнитных частиц – в направлении действия механических сил. Данное обстоятельство снижает производительность аппарата и способствует ухудшению качества продуктов.

При обогащении сильномагнитных руд сопротивление среды оказывает меньшее влияние, чем при сепарации слабомагнитных руд.

Замена воздушной среды на водную вызывает:

1. Уменьшение силы тяжести (по закону Архимеда) до величины:

$$g_0 = g(\delta - \Delta)/\delta, \text{ где } \delta, \Delta - \text{плотность частицы и среды, соответственно;}$$

2. Появление добавочной удельной силы сопротивления среды движению магнитной частицы. Для тонких частиц ($d < 0.2$ мм) справедливо выражение:

$$F_c = 18\mu V_x/d^2 \delta \quad (4.9)$$

где μ – вязкость среды, для воды $\mu = 10^{-3}$ Нсек/м²,

V_x – скорость движения частицы,

d и δ – диаметр и плотность частицы, соответственно.

С учетом выражений (9.4 и 9.9) получим окончательно:

$$F_{\text{маг}} \geq \frac{V^2}{R} - g \frac{\delta - \Delta}{\delta} \cos \alpha + \frac{18\mu V_x}{d^2 \delta} \quad (4.10)$$

Здесь не учитывается коэффициент $b = 1 + \alpha_m$, т.к. мокрая сепарация осуществляется в режиме извлечения, т.е. с подачей материала снизу, когда на барабане присутствует в основном магнитная фракция.

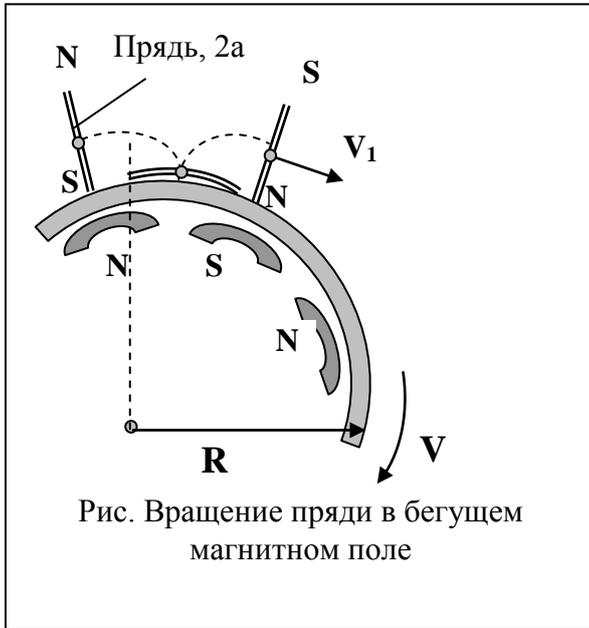
4.4 Динамика движения частиц при сепарации с верхней подачей материала в бегущем магнитном поле

При сухой магнитной сепарации *крупной магнетитовой руды* на барабанных сепараторах с верхней подачей материала обычно выделяют отвальные хвосты, а сrostки и магнитная фракция образуют промпродукт, требующий своего дальнейшего обогащения. В этом случае применяют тихоходный режим сепарации ($V = 1-2$ м/с).

При сухой магнитной сепарации *мелкой магнетитовой руды* выделяют промпродукт и магнитный концентрат. Тихоходный режим в этом случае не обеспечивает требуемую чистоту концентрата. Поэтому здесь применяют быстроходный режим.

Значительно улучшается качество магнетитового концентрата при применении быстроходного режима барабанного сепаратора с *бегущим магнитным полем*.

При попадании в магнитное поле мелко- и тонкозернистые частицы магнетита образуют *магнитные пряди*. Они, как длинные тонкие тела, намагничиваются и образуют собственное магнитное поле, которое взаимодействует с полем сепаратора. При перемещении магнитной фракции барабаном относительно чередующихся полюсов магнитной системы пряди поворачиваются относительно своих краев. При этом возникает дополнительная центробежная сила, которую необходимо учитывать.



Обозначим:

V_1 – скорость перемещения центра тяжести пряди за счет ее поворота;
 S – шаг полюсов;
 $2a$ – длина пряди;
 l_1 – путь прохождения центра тяжести пряди при одном обороте (полуокружность);
 T – время одного полного поворота пряди на расстоянии $2S$ (путь – $2l_1$);
 V и R – окружная скорость барабана и его радиус.

Из рисунка следует:

$$V_1 = 2l_1/T, \quad (4.11)$$

где $l_1 = \pi a$ – полуокружность, описываемая центром тяжести пряди.

Учитывая, что $T = 2S/V$ и с учетом (4.11) получим:

$$V_1 = 2l_1/T = 2\pi aV/2S = \pi aV/S \quad (4.12)$$

Следовательно, дополнительная центробежная сила, вызванная вращением пряди, равна:

$$\Delta f_{ц} = \frac{V_1^2}{a} = \frac{\pi^2 a V^2}{S^2} \quad (4.13)$$

Итоговая удельная магнитная сила, необходимая для извлечения сильномагнитных частиц в бегущем магнитном поле (с учетом 4.4):

$$F_M \geq \frac{V^2}{R} + \frac{\pi^2 a V^2}{S^2} - g \cos \alpha \quad (4.14)$$

Следует отметить, что при сепарации в режиме удерживания в последнем выражении можно учесть коэффициент $b = 1 + \alpha_m$, а в режиме извлечения – не учитывать. В последнем режиме угол $\alpha > 90^\circ$ и, следовательно, последний член выражения (4.14) будет суммироваться.

Заметим, что вращение прядей измельченного магнетита способствует высвобождению из нее немагнитных частиц, механически захваченных прядью при ее образовании. Таким образом, бегущее магнитное поле обеспечивает более чистый концентрат, как при сухом, так и при мокром обогащении.

4.5 Динамика движения частиц руды в магнитных сепараторах с нижней подачей материала

В сепараторах с нижней подачей (режим извлечения) материал подается под ленту, барабан или валок вибрационными питателями, лентой или самотеком.

Режим извлечения основан на изменении траектории движения магнитных частиц таким образом, чтобы при прохождении рабочей зоны длиной L они сместились на расстояние h и отделились от немагнитных частиц.

В сепараторах с нижней подачей возможны 3 схемы перемещения материала через рабочую зону:

- руда и магнитный продукт перемещаются прямолинейно;
- руда перемещается прямолинейно, магнитный продукт – по криволинейной траектории;
- руда и магнитный продукт перемещаются по криволинейным траекториям.

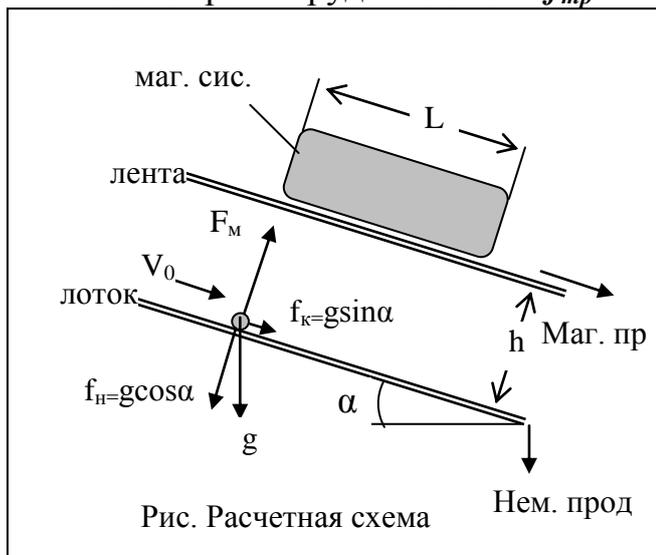
Рассмотрим динамику движения материала отмеченных случаев.

4.5.1 Динамика движения частиц руды в сепараторах с прямолинейным перемещением руды и магнитного продукта

Расчетная схема данного режима приведена на рисунке, где приведены принятые обозначения. Здесь угол α – угол наклона лотка.

На магнитную частицу массой $m=1$ действуют силы:

- магнитная сила - $F_m = \mu_0 \chi H \text{grad} H$;
- сила тяжести – $f_m = g$, имеющая две составляющие (см. схему);
- сила трения руды о лоток - f_{mp}



Силу трения магнитной частицы можно не учитывать, т.к. она отделяется от лотка в начале рабочей зоны.

Движение частицы перпендикулярно лотку возможно, если выполняется условие:

$$F_m > f_n$$

Разность этих сил (F_1) определяет перемещение частицы в нормальном направлении к лотку:

$$F_1 = F_m - f_n \quad (4.15)$$

Движение частицы по длине рабочей зоны L вызывается касательной составляющей силы тяжести с ускорением $a = f_k/m = g \sin \alpha$.

Процесс выделения магнитной фракции будет иметь место, если время преодоления частицей расстояния h будет меньшим времени, необходимого частице для преодоления расстояния L . Это условие разделения по данной схеме.

Обозначим:

- V_0 – начальная скорость движения частицы при поступлении в рабочую зону;
- t_1 – время, за которое частица пройдет расстояние L (длина рабочей зоны);
- t_2 – время, за которое частица пройдет расстояние h .

Тогда, для равноускоренного движения можно записать:

$$L = \frac{gt_1^2}{2} \sin \alpha + V_0 t_1 \quad (4.16)$$

Расстояние h частица преодолевает под действием силы F_I . Из (4.15) следует:

$$F_m = g \cos \alpha + F_I \quad (4.17)$$

Можно допустить, что частица под действием данной силы движется равноускоренно с ускорением: $a_I = F_I$ (при $m = 1$).

Тогда следует:
$$h = \frac{F_I t_2^2}{2} \quad (4.18)$$

Крайнее условие сепарации $t_1 = t_2$. Решим совместно уравнения (4.16 и 4.18) относительно F_I . Для упрощения примем угол $\alpha = 0$, что не внесет существенной ошибки:

$$L = V_0 t_1, \quad t_1 = L/V_0. \quad (4.19)$$

Из (4.18) следует:
$$F_I = \frac{2h}{t_2^2} \quad (4.20)$$

Заменим t_2 на равное ему значение t_1 (4.19):

$$F_I = \frac{2hV_0^2}{L^2} \quad (4.21)$$

Окончательно с учетом (4.15) в случае горизонтально и наклонного ($\alpha < 35^\circ$) движения материала получим:

$$F_m \geq g + \frac{2hV_0^2}{L^2} \quad (4.22)$$

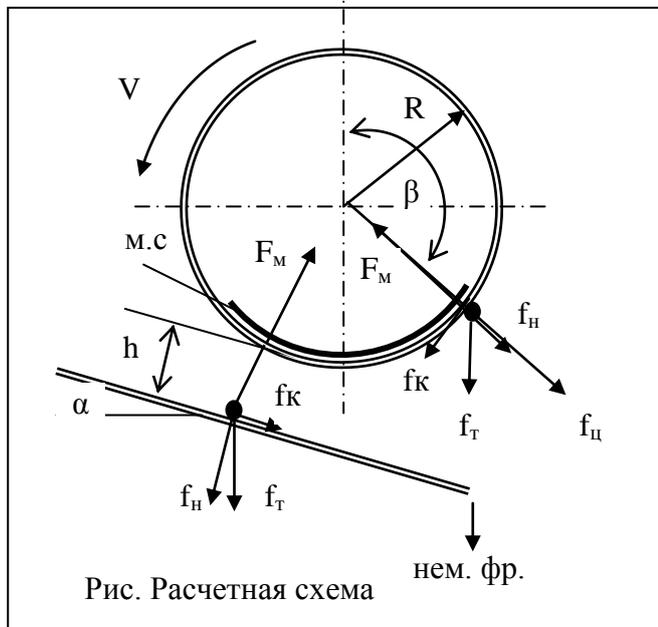
Из выражения (4.22) можно оценить допустимую (критическую) начальную скорость $V_{0кр}$ материала, при которой обеспечивается извлечение частиц с заданной магнитной силой F_m :

$$V_{0кр} = L \sqrt{\frac{\mu_0 \chi H \text{grad} H - g}{2h}} \quad (4.23)$$

4.5.2 Динамика движения частиц руды в сепараторах с прямолинейным перемещением руды и криволинейным магнитного продукта

Движение магнитных частиц в данном случае можно разбить на 2 последовательно протекающих этапа (см. схему):

- подъем магнитного зерна и притяжение его к барабану (валку);
- транспортирование магнитных частиц барабаном в зону разгрузки.



На рисунке представлены все действующие силы и принятые обозначения.

Первый этап с некоторым допущением можно считать подобным схеме, рассмотренной в п. 4.5.1. Следовательно, для данного этапа справедливо выражение, приведенное в 9.4.1 (4.22).

$$F_{1,m} \geq g + \frac{2hV_0^2}{L^2} \quad (4.24)$$

Второй этап аналогичен схеме, рассмотренной в разделе 4.1, где необходимая магнитная сила оценивается:

$$F_{2,m} \geq \left(\frac{V^2}{R} - g \cos \beta \right) \quad (4.25)$$

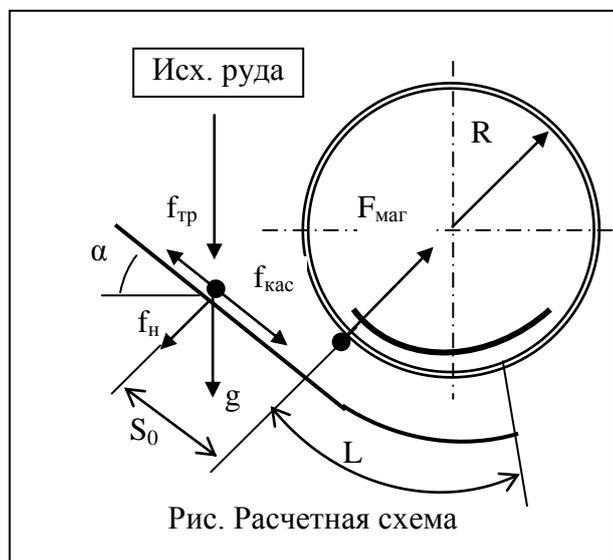
Здесь опущен коэффициент $b = 1 + \alpha_m$, (режим извлечения), а угол α заменен углом $\beta > 90^\circ$.

Таким образом, в данном режиме движения частиц для подъема магнитного зерна на поверхность барабана (извлечение) необходима сила, действующая на поверхности лотка – $F_{1,m}$ (4.24), а для удерживания данного магнитного зерна на поверхности барабана – сила $F_{2,m}$ (4.25). Большее значение расчетных сил и будет необходимым для реализации рассмотренной схемы сепарации.

4.5.3 Динамика движения частиц руды в сепараторах с криволинейным перемещением руды и магнитного продукта

В данном режиме исходная руда поступает в рабочую зону самотеком: вначале (до рабочей зоны) по плоскому наклонному лотку, затем (в рабочей зоне) - по криволинейному (рисунок). Аналогично разделу 4.5.1 здесь сепарация осуществляется также в два этапа. Расчетные силы по этапам:

$$F_{1,m} \geq g + \frac{2hV_0^2}{L^2} \quad (9.26) \quad \text{и} \quad F_{2,m} \geq \left(\frac{V^2}{R} - g \cos \beta \right) \quad (4.27)$$



Однако в данном случае начальная скорость зерна при входе его в рабочую зону определяется как длина S_0 пути S_0 , так и коэффициентом трения зерна о наклонный лоток. Определим зависимость начальной скорости зерна от парамагнетизма F_M тров.

Сила трения зерна определяется (рис):

$$f_{mp} = f_H \operatorname{tg} \varphi = g \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi \quad (4.28).$$

Частица массой $m = 1$ будет двигаться по лотку под действием удельной силы:

$$F = f_{кас} - f_{mp} \quad (4.29)$$

С другой стороны: $F = mg_0 = g_0 \quad (4.30).$

Здесь g_0 – ускорение движения частицы.

Тогда следует: $g_0 = g \sin \alpha - g \cos \alpha \tan \varphi$.

Преобразуем последнее выражение:

$$g_0 = g(\sin \alpha \cos \varphi - \sin \varphi \cos \alpha) / \cos \varphi.$$

Имеем:

$$g_0 = g(\sin(\alpha - \varphi)) / \cos \varphi. \quad (4.31)$$

В момент поступления в рабочую зону частица будет иметь начальную скорость:

$V_0 = g_0 t$; с другой стороны частица пройдет путь $S_0 = g_0 t^2 / 2$. Откуда следует:

$$t = \sqrt{\frac{2S_0}{g_0}}, \quad \text{тогда} \quad V_0 = g_0 t = g_0 \sqrt{\frac{2S_0}{g_0}} = \sqrt{2S_0 g_0} \quad (4.32)$$

Из (4.31 и 4.32) следует:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2S_0 g \sin(\alpha - \varphi)}{\cos \varphi}} \quad (4.33)$$

Критическое значение начальной скорости определяется выражением (4.23). Следовательно, угол наклона лотка (α) и длина пути (S_0) должны быть выбраны такими, чтобы выполнялось условие: $V_0 < V_{0кр}$.

4.6 Влияние сил сцепления частиц на процесс сухой магнитной сепарации

При сухом магнитном обогащении на эффективность процесса существенно влияют молекулярные силы притяжения, появление которых особенно заметно для тонких частиц.

Силу молекулярного притяжения (сила сцепления) между двумя сферическими частицами можно оценить из равенства Б.В. Дерягина:

$$f_{сц} = \frac{2A\pi d_1 d_2 \sigma_n}{d_1 + d_2}, \quad (4.34)$$

где A – опытный коэффициент, учитывающий площадь соприкосновения частиц, наличие влаги и прочие факторы;

d_1 и d_2 – диаметры частиц;

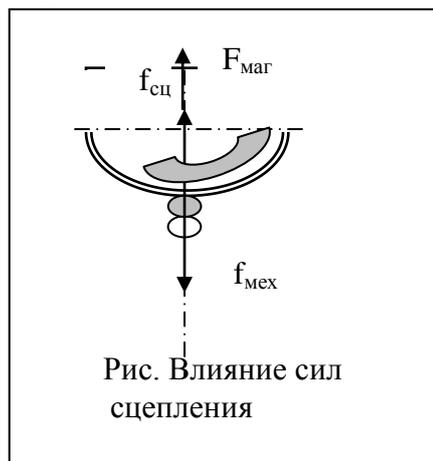
σ_n – поверхностное натяжение на границе раздела частица-воздух.

В случае равенства размеров частиц уравнение принимает вид:

$$f_{сц} = A\pi d \sigma_n \quad (4.35)$$

Рассматривая две взаимодействующие частицы (рис.), одна из которых магнитная, можно прийти к выводу. Если сила сцепления частиц превысит равнодействующую силу (центробежной и силы тяжести), действующую в режиме извлечения напортив силы сцепления, то образовавшийся агрегат попадет в магнитную

фракцию (в случае достаточной магнитной силы, действующей на агрегат). Это засоряет магнитный концентрат.



Если же образовавшийся агрегат (сросток) не извлечется магнитной силой – последний выделяется в отходы, что сопровождается потерей магнитной фракции.

Таким образом, в любом случае ухудшается эффективность сепарации. Особенно отрицательно влияют на процесс частицы крупностью менее 20 мкм.

Существует несколько способов борьбы с этим явлением присухой сепарации:

1. Предварительное обеспыливание исходного продукта.
2. Применение реагентов диспергаторов.
3. Подача руды в рабочую зону с помощью вибрационных питателей.
4. Подача тонкого материала в виде взвешенного в воздушном потоке слоя или в виде кипящего слоя.
5. Применение высокоскоростного режима движения вала (барабана).

Однако перечисленные методы, кроме 3 и 5, нетехнологичны и не эффективны. При этом следует решать сложную задачу предохранения рабочего помещения от запыленности.

В этой связи на практике сухая сепарация мелкого и тонкого материала не получила широкого применения.

4.7 Особенности движения пульпы в сепараторах со слабым полем для мокрого обогащения

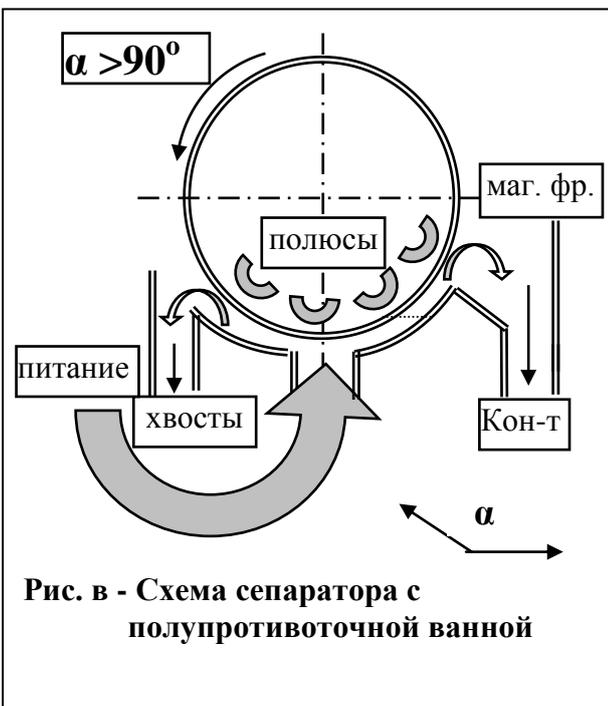
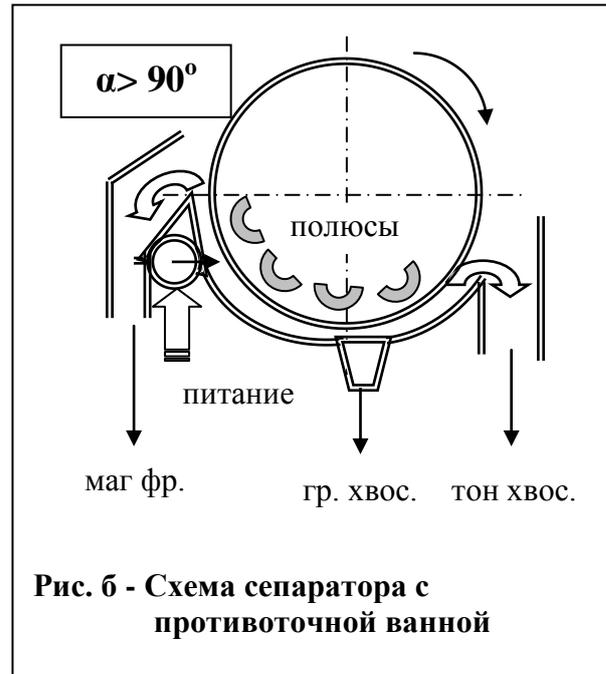
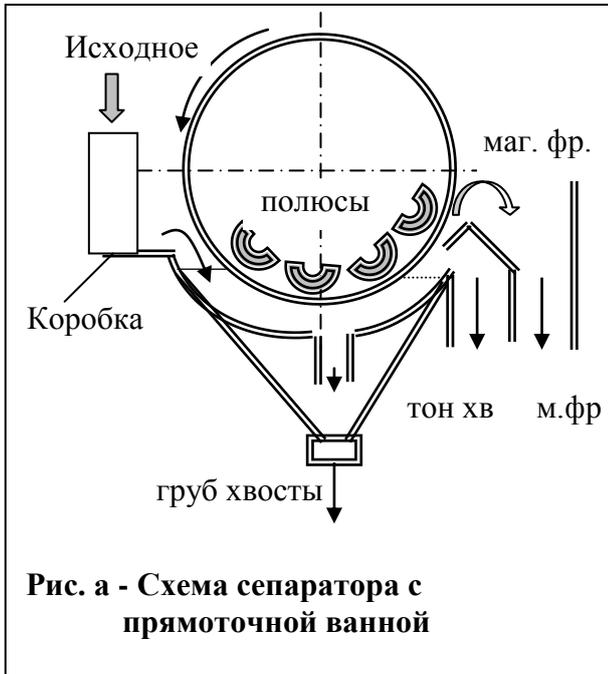
При мокрой сепарации сильномагнитных руд наибольшее распространение получили барабанные сепараторы с нижней подачей материала (пульпы).

В зависимости от крупности обогащаемой руды применяются сепараторы с тремя типами ванн:

- сепараторы с **прямоточной ванной** – для обогащения крупнозернистой руды (2 – 6 мм), (рис. а);
- сепараторы с **полупротивоточной (ПП) ванной** – для обогащения мелкозернистой руды (2 – 3 мм и менее), (рис. б);
- сепараторы с **противоточной (П) ванной** – для обогащения тонкозернистой руды (0.3 мм и менее), (рис. в).

В прямоточных ваннах вращение барабана совпадает с направлением движения питания и продуктов сепарации, через рабочую зону сепаратора проходит весь материал. Угол раскрытия веера продуктов здесь – **менее 90°**.

У противоточных ванн барабан вращается противоположно направлению движения материала и немагнитного продукта. Угол раскрытия веера продуктов здесь – **более 90°**.



У полупротивоточных ванн питание подается снизу под барабан, вращение его противоположно направлению движения немагнитного продукта. Угол раскрытия веера продуктов у **III** ванн – **более 90°** .

У первых двух сепараторов ("а" и "б") зернистый немагнитный продукт разгружается через регулируемые отверстия в днище ванны, а тонкие хвосты – через переливной порог. Тем самым происходит предварительная классификация хвостов по крупности.

В сепараторах с **II** и **III** ваннами в начале рабочей зоны извлекается около 80% магнитных частиц. Это приводит к тому, что при равной производительности по питанию и прочих равных условиях через концентрическую часть рабочей зоны

сепараторов проходит около 60 – 70 % объема пульпы, проходящей через рабочую зону прямоточного сепаратора. Сопоставление показателей работы сепараторов на мелком и тонком материале показывает, что сепараторы с **II** и **III** ваннами работают значительно эффективнее, чем с прямоточной ванной, особенно при большей производительности.

Полупротивоточная ванна характеризуется наиболее спокойным движением пульпы. При этом вектор скорости движения пульпы совпадает с направлением действия магнитной силы. Это создает благоприятные условия для извлечения тонких частиц, магнитные свойства которых, из-за малой крупности, ослаблены.

Для того чтобы рабочая зона сепараторов была полностью заполнена, необходимо рассчитать суммарное сечение отверстий, которое должно обеспечить постоянный перелив пульпы через сливной порог. Диаметр выпускных отверстий должен быть достаточно большим, чтобы исключить их зашламовывание. Минимальный диаметр выпускного отверстия зависит от крупности обогащаемой руды и производительности сепаратора. На практике принимают минимальный диаметр отверстия 18 – 20 мм при крупности питания до 0.5 мм и 25 – 30 мм при крупности зерен 0 – 3 мм.

Максимальное суммарное сечение выпускных отверстий, обеспечивающее наличие перелива, можно оценить из равенства:

$$Q_{xв} = 0.8S_0\sqrt{2gH}, \quad \text{где} \quad (4.36)$$

$Q_{xв}$ – расход пульпы, выгружающий немагнитную фракцию;

0.8 – расходный коэффициент;

S_0 – допустимое суммарное сечение все отверстий;

H – статический напор пульпы в ванне.

Из (4.36) следует:

$$S_0 = \frac{0.28Q_{xв}}{\sqrt{H}} \quad (4.37)$$

Практика эксплуатация магнитных сепараторов показала, что на 1 м ширины ванны достаточно иметь по 2 выпускных отверстия.

4.8 Влияние плотности пульпы на показатели сепарации магнетитовой руды

Содержание твердого в исходном питании на качественные показатели процесса сепарации влияет двояко. С уменьшением плотности питания содержание железа в концентрате повышается. Это объясняется тем, что в данном случае падает концентрация взвешенных немагнитных частиц и, следовательно, уменьшается количество шламов, механически захваченных прядью и заносимых в магнитный продукт вращающимся барабаном.

С другой стороны, с уменьшением содержания твердого в питании при постоянной объемной нагрузке на сепаратор качество немагнитного продукта несколько ухудшается, хотя скорость перемещения пульпы в рабочей зоне не возрастает. Последнее объясняется тем, что при меньшей плотности пульпы снижается длина магнитных прядей и, как следствие, затрудняется их притяжение к барабану сепаратора.

Таким образом, регулируя плотность исходной пульпы, можно существенно влиять на качество магнитной фракции и отходов.

5. МАГНИТНЫЕ СЕПАРАТОРЫ И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В технологии магнитного обогащения применяется оборудование: магнитные сепараторы, магнитные конусы и дешламаторы, магнитные гидроциклоны, намагничивающие и размагничивающие аппараты, лабораторные магнитные анализаторы и пр..

Общая характеристика и классификация магнитных сепараторов

Магнитные сепараторы в общем случае включают следующие узлы:

- рабочий орган – устройство для перемещения магнитной фракции из рабочей зоны сепаратора и ее выгрузки (барабан, лента, валок, диск, ротор) , таких устройств в сепараторе может быть несколько, соединяются последовательно или параллельно;
- магнитную систему из постоянных магнитов или из стальных сердечников с обмоткой, питаемой, как правило, постоянным током;
- корпус (рама) с шиберами - для сухой сепарации или ванну – при мокром обогащении;
- питатель – для подачи материала в рабочую зону, это – лоток, барабан, лента (для сухого обогащения) или приемный лоток, коробка, желоб (для мокрой сепарации);
- блок питания для электромагнитных сепараторов и пульт управления.

Магнитные поля сепараторов создаются постоянными магнитами (слабые поля) либо сердечником из магнитомягкого материала с обмоткой постоянного тока (сильные и слабые поля). Магнитные системы с постоянными магнитами изготавливаются из специальных магнитомягких сплавов (ЮДНК, АЛНИ и пр.). Сплавы дорогие, содержат никель, кобальт. В настоящее время более перспективно применение феррито-бариевых, феррито-стронциевых (металлокерамических) магнитов. Последние имеют меньшее значение остаточной намагниченности, но большее - коэрцитивной силы. Металлокерамические магниты трудно поддаются механической обработке, относительно хрупкие, имеют малую высоту. Поэтому магнитные полюса набираются из элементарных плоских магнитов и склеиваются.

Барабаны, ванны и другие вспомогательные элементы сепараторов изготавливаются из немагнитных износостойких сплавов (нержавеющая сталь). Поверхность быстроизнашивающихся элементов гуммируется.

Классификация магнитных сепараторов осуществляется по многим признакам. Первые буквы названий некоторых признаков введены в обозначение сепараторов (ГОСТ 10512-70).

Прежде всего, **по виду источника магнитной энергии машины** классифицируются на сепараторы с постоянными магнитами (**П**) и электромагнитные сепараторы (**Э**). В обозначении сепаратора на первом месте присутствует выделенная заглавная литера.

В зависимости **от напряженности в рабочей зоне** сепараторы классифицируются на сепараторы со слабым полем (напряженность до 120 кА/м) и сепараторы

с сильным полем (напряженность поля 800 – 1600 кА/м). Первая группа машин применяется для обогащения сильномагнитных руд, вторая – для слабомагнитных руд. Последние сепараторы имеют всегда электромагнитную систему.

По *виду рабочего органа* сепараторы классифицируются на барабанные (**Б**), ленточные (**Л**), валковые (**В**), дисковые (**Д**), роторные (**Р**). В обозначении сепаратора на втором месте присутствует выделенная заглавная литера. Например, сепаратор типа ПБ, ЭВ и т. далее.

По *виду среды обогащения* сепараторы подразделяются на сепараторы для сухого (**С**) и мокрого (**М**) обогащения. В обозначении сепаратора на третьем месте присутствует выделенная заглавная литера. Пример, сепараторы типа ПБМ, ЭВС, ЭБС и т. далее.

По *виду магнитного поля* в рабочей зоне многополюсные сепараторы (со слабым полем) классифицируются на машины с бегущим магнитным полем и без бегущего поля (см. рис.). Первую группу называют еще сепараторами с магнитным перемешиванием, или сепараторами с чередующимися полюсами по образующей рабочего органа (по окружности барабана, по ходу движения магнитного продукта). Вторую группу именуют – сепараторы без магнитного перемешивания или сепараторы с чередованием полюсов по оси барабана. Сепараторы с бегущим магнитным полем применяются обычно для обогащения измельченных магнетитовых руд в водной среде. Бегущее поле обеспечивает более чистые магнитные концентраты, так как при вращении прядей происходит вымывание немагнитных частиц из прядей, захваченных при их образовании.

При обогащении относительно крупной руды пряди не образуются и здесь бегущее магнитное поле не нужно.

По *способу подачи исходного материала* в рабочую зону сепараторы классифицируются на машины с верхней подачей материала (**В**) и нижней. В обозначении сепараторов с сильным полем на 4 – м месте может стоять литера **В** (через дефис).

С верхней подачей обычно применяются сепараторы для сухого обогащения более крупного и зернистого материала.

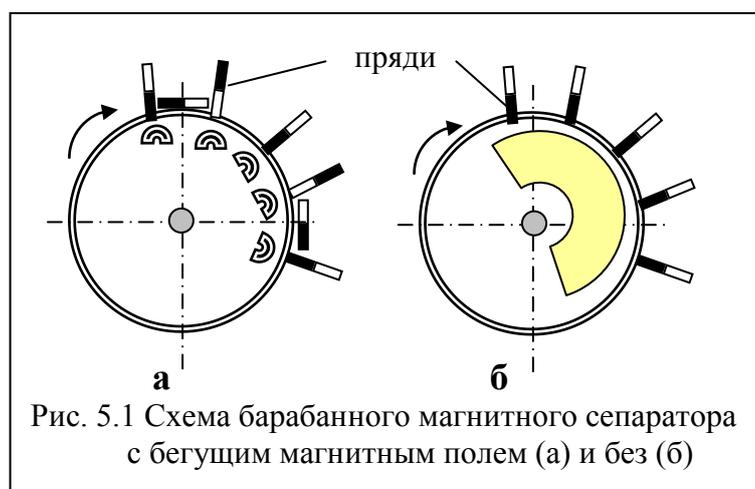


Рис. 5.1 Схема барабанного магнитного сепаратора с бегущим магнитным полем (а) и без (б)

По *направлению движения исходной пульпы и продуктов обогащения* барабанные сепараторы классифицируются по типу применяемых ванн: прямоточные (-), противоточные (**П**) и полупротивоточные (**ПП**) (см. выше). В обозначении барабанных сепараторов для мокрого обогащения приводится соответствующая литера (на последнем месте буквенной аббревиатуры, через дефис).

Например, сепараторы типа ЭВС-В; ПБМ; ПБМ-П; ПБМ-ПП.

И, наконец, обозначение сепараторов по указанному ГОСТу содержит и цифры. Первая цифра указывает число рабочих органов, (единица не ставится). По-

следние два числа через косую линию указывают размеры рабочего органа в "см" (диаметр и длина). Например: 6ЭВС-В-63/200; 2ПБМ-ПП-250/350 (6 – ти валковый электромагнитный сепаратор для сухого обогащения, с верхней подачей материала, диаметр валка 63 см, длина валка – 200 см; 2 – х барабанный сепаратор с постоянными магнитами для мокрого обогащения, с полупротивоточной ванной, диаметр барабана – 250 см, длина – 350 см).

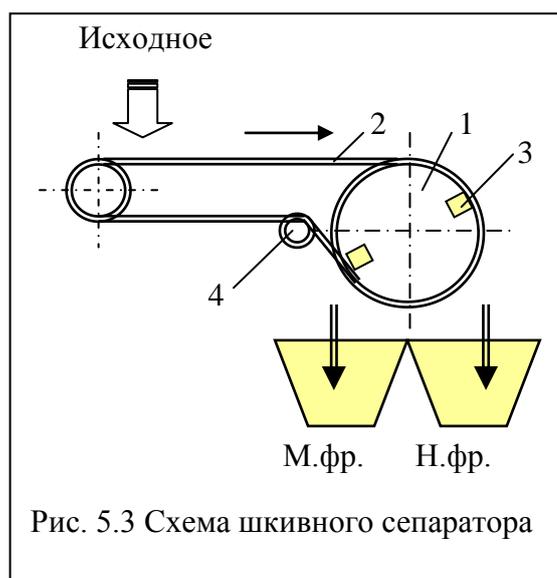
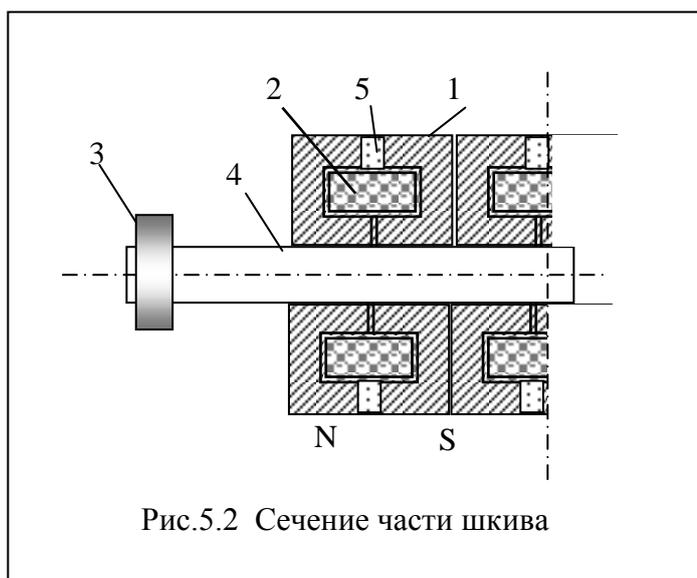
В связи с разработкой новых сепараторов (полиградиентных, высокочастотных и т.д.) появляются и не предусмотренные ГОСТом обозначения

5.2 Магнитные сепараторы со слабым полем для сухого обогащения

5.2.1 Шкивной магнитный сепаратор

Может применяться для сухой сепарации легкообогатимой сильномагнитной руды крупностью от 10 до 120 мм, а также в качестве железоотделителей при транспортировании немагнитных материалов.

Конструктивно представляет собой (рис. 5.2) барабан (шкив) с электромагнитной системой. Полюса (1) выполнены в виде Ш-образных дисков (по всей окружности барабана) между которыми расположены обмотки (2). Питание к обмоткам поступает от коллектора (3) через сверления (на рис. не показаны) в вале (4).



По окружности барабана предусмотрен зазор, образующий рабочую зону, который закрыт немагнитной вставкой (5). Полюса чередуются по оси барабана.

Схема работы шкива в качестве обогащательного аппарата показана на рис. 5.3.

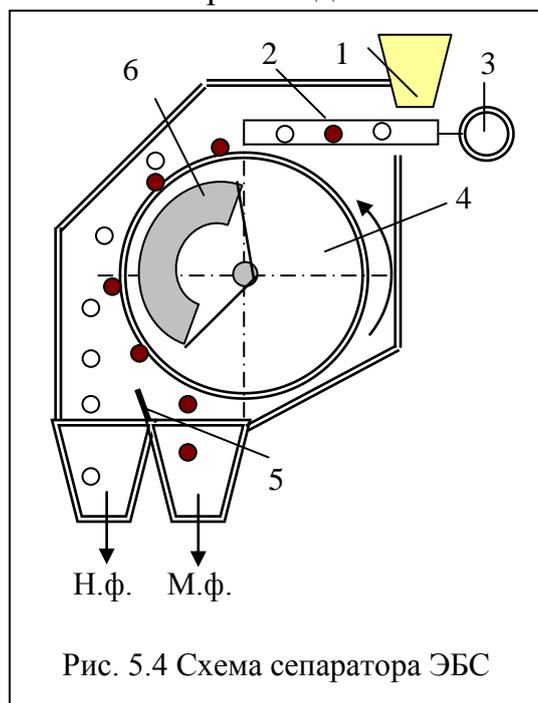
Сепаратор имеет вид короткого ленточного конвейера, где в качестве приводного барабана использован электромагнитный шкив (1). На поверхности барабана установлены продольные немагнитные вставки (3), обеспечивающие разгрузку магнитной фракции вблизи отклоняющего ролика (4).

В качестве железоотделителя электромагнитный шкив используется в качестве приводного барабана транспортирующего ленточного конвейера.

Шкивы выпускаются Луганским машзаводом им. Пархоменко шириной до 1400 мм при диаметре до 1000 мм.

5.2.2 Электромагнитные барабанные сепараторы типа ЭБС

Сепаратор ЭБС-90/100. Служит для сухого предварительного обогащения сильномагнитных руд крупностью до 50 мм. Напряженность поля в рабочей зоне – 120 кА/м. Производительность - до 60 т/ч.



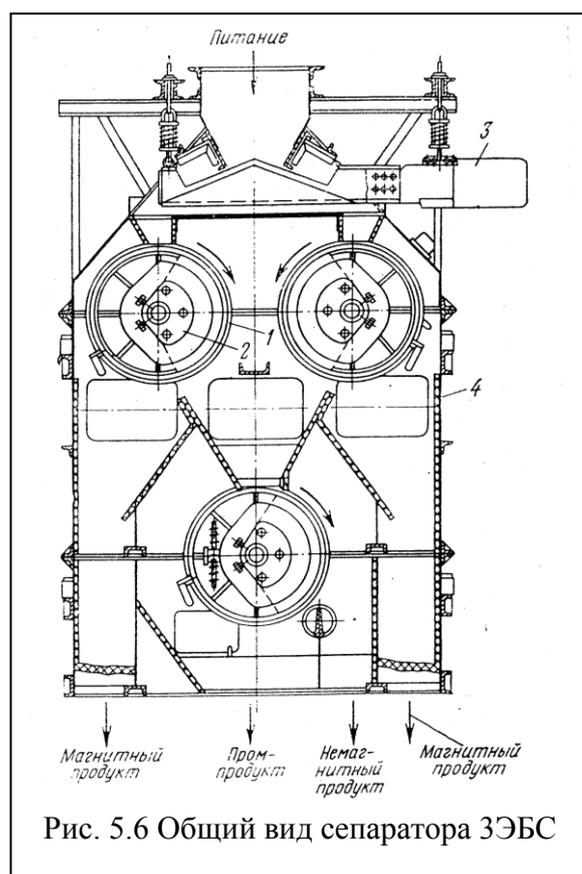
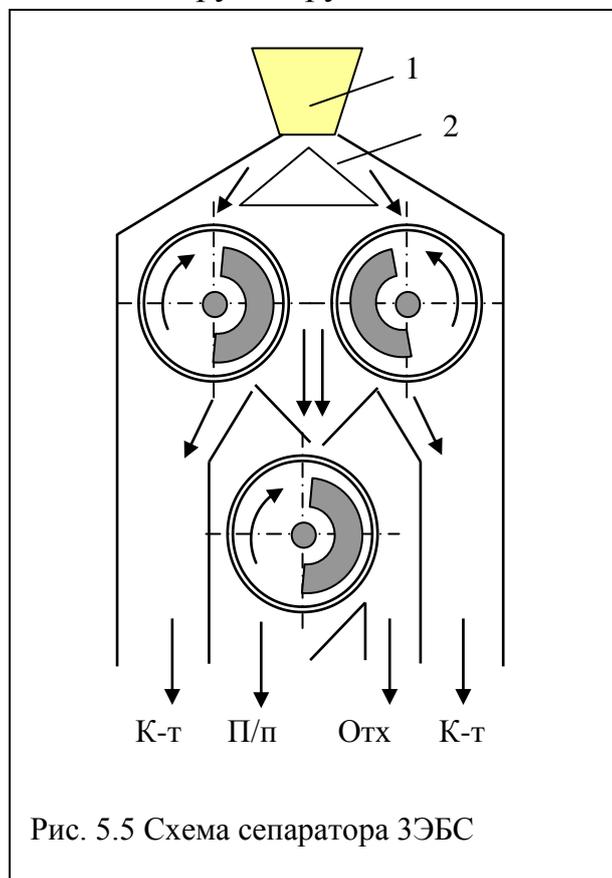
На рис. 5.4 показана упрощенная схема сепаратора. Исходная руда из бункера (1) с помощью лоткового питателя (2) с вибровозбудителем (3) поступает на поверхность барабана (4). Режим работы сепаратора – удерживание, т.е. с верхней подачей материала.

Качеством продуктов сепарации можно управлять в небольших пределах с помощью делительного шибера (5).

Магнитные полюса (6) в виде секторов чередуются по оси барабана, следовательно, магнитное перемешивание отсутствует. Между магнитными секторами располагаются катушки (обмотки) с водяным охлаждением (на рисунке не показано)

Применяется на редко из-за малой производительности и невысокой эффективности.

Сепаратор 3ЭБС-90/100. Сепаратор служит для сухого обогащения сильномагнитной руды крупностью до 50 – 70 мм.



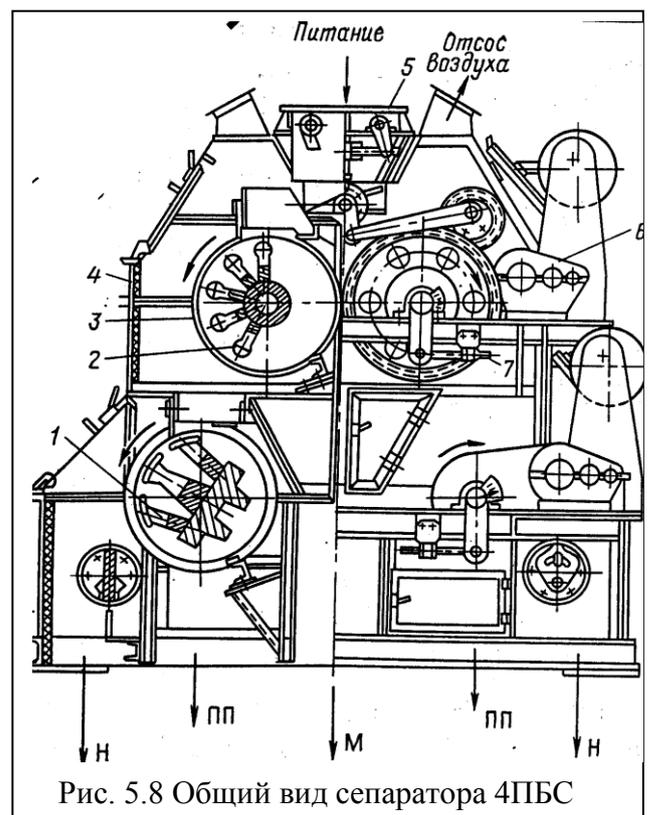
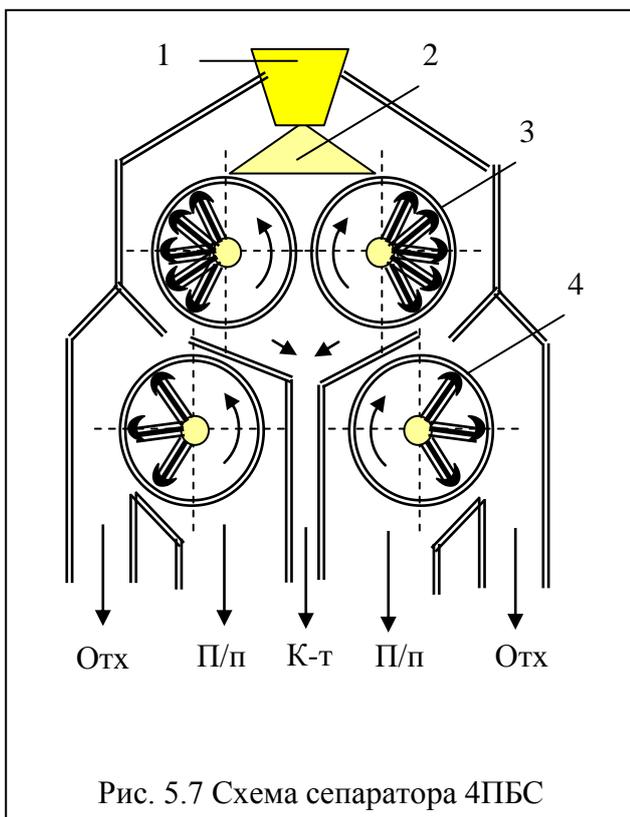
Производительность – до 140 т/ч. Включает 3 барабана, два из которых работают параллельно (рис. 5.5 и 5.6). Напряженность поля в рабочей зоне верхних барабанов – **60 кА/м**, нижнего – **120 кА/м**.

Исходная руда из бункера (1) вибрационным питателем (2, 3) распределяется на два верхних барабана. Данные барабаны удерживают на поверхности из-за малой напряженности наиболее магнитную фракцию и разгружают ее в отделения концентрата (см. схему). Менее магнитная фракция поступает на нижний барабан с большей напряженностью в рабочей зоне. Это позволяет выделить промежуточный продукт (П/п) и немагнитные отходы (Отх).

Конструкция барабанов и магнитных систем аналогична вышерассмотренным в сепараторе ЭБС. Исключение – верхние магнитные системы не имеют охлаждения, т.к. напряженность поля у них 60 кА/м., полюса магнитных систем чередуются также по осям барабанов.

5.2.3 Магнитные сепараторы с постоянными магнитными системами

Сепаратор 4ПБС-63/200. Применяется для сухого обогащения сильномагнитных руд крупностью до 50 мм. Производительность – до 400 т/ч. Магнитная система выполнена из сплава ЮНДК-24.



Сепаратор содержит 4 барабана, два верхних (3), рис. 5.7 и 5.8) имеют пятиполюсную магнитную систему, реализующую бегущее магнитное поле, работают параллельно и выделяют наиболее магнитную фракцию (концентрат). Нижние барабаны (4) характеризуются низшей частотой бегущего поля (3 полюса), что обес-

печивает выделение промпродукта и отходов. Питание сепаратора осуществляется из бункера (1) с помощью вибропитателя (2).

Приводы барабанов позволяют ступенчато изменять частоту их вращения в пределах – $(50 - 100) \text{ мин}^{-1}$ для верхних и $(30 - 50) \text{ мин}^{-1}$ для нижних барабанов.

Применение постоянных магнитов позволило снизить металлоемкость и энергозатраты на 1 т часовой производительности по сравнению с сепаратором 3ЭБС: 3ЭБС – 90 кг/т и 90 вт/т, 4ПБС – 19 кг/т и 18 вт/т соответственно.

Сепаратор ПБСЦ-63/100. В обозначении сепаратора литера "Ц" обозначает "центробежный режим". Предназначен для обогащения мелкозернистой магнетитовой руды крупностью до 3 мм. Производительность до 50 т/ч.

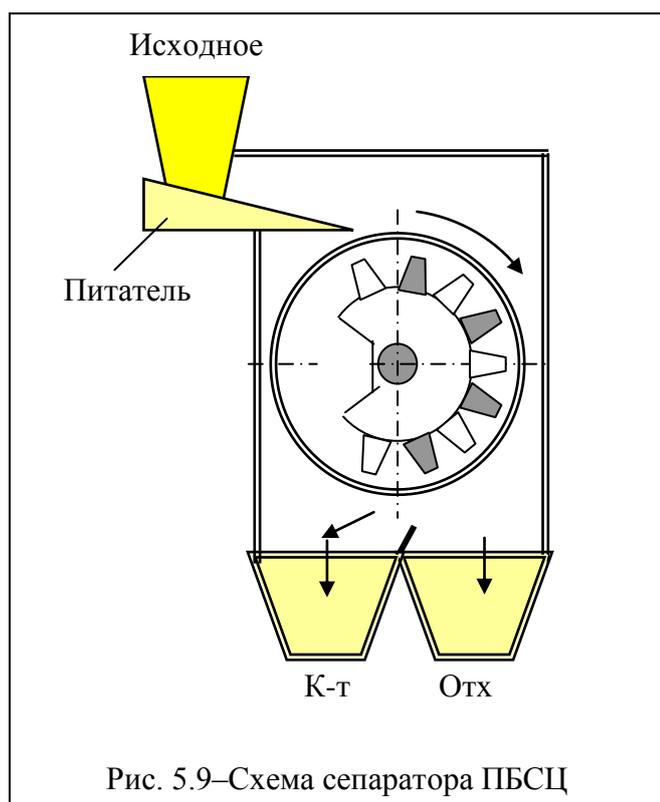


Рис. 5.9–Схема сепаратора ПБСЦ

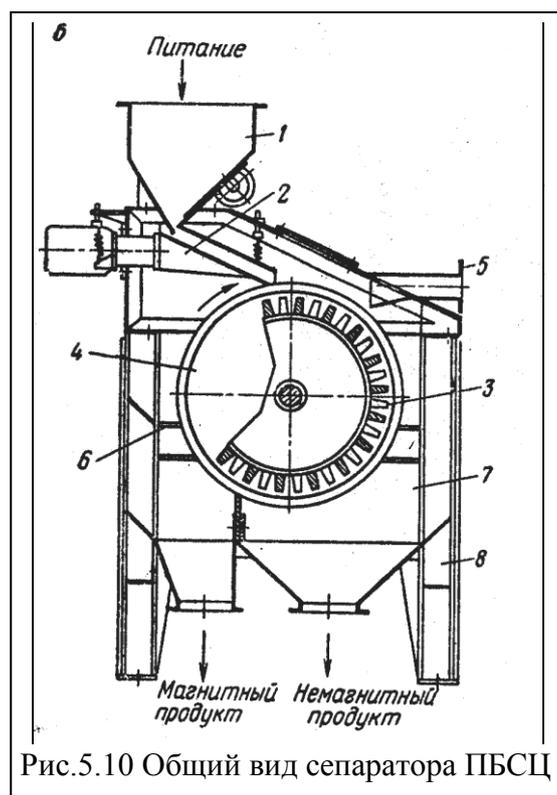


Рис.5.10 Общий вид сепаратора ПБСЦ

Содержит бункер (1), питатель (2), многополюсную магнитную систему (3), барабан (4). Полюса выполнены из сплава ЮНДК-24, шаг полюсов – 50 мм, чередование полюсов – по периметру барабана. Частота вращения барабана – 300 мин^{-1} , что обеспечивает бегущее магнитное поле с повышенной частотой (90 Гц) и способствует очистке магнитных прядей от немагнитных включений.

Промышленные испытания сепаратора показали его возможность выделять относительно чистый концентрат и промежуточный продукт (в ряде случаев – отвальные отходы).

5.3 Барабанные магнитные сепараторы со слабым полем для мокрого обогащения и регенерации суспензий

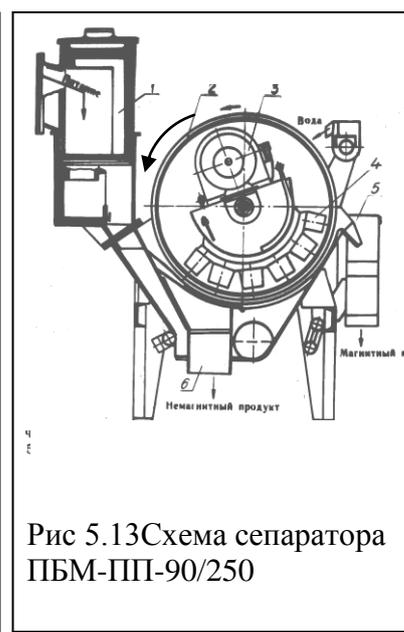
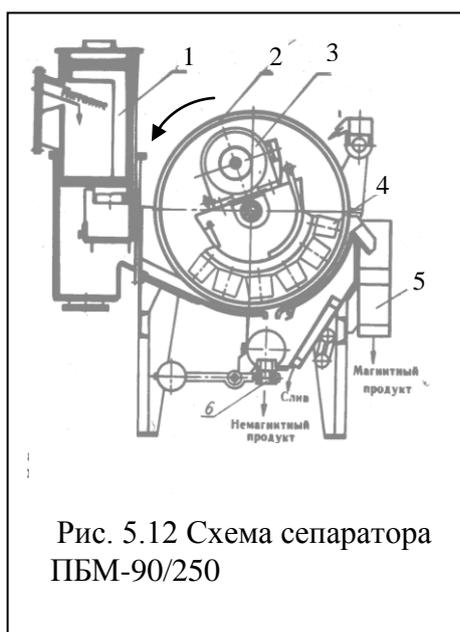
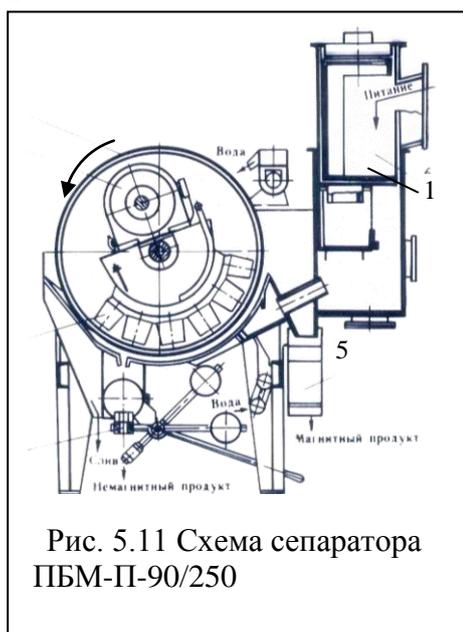
5.3.1 Сепараторы для обогащения типа ПБМ.

Данные сепараторы получили наибольшее применение при обогащении тонковкрапленных сильномагнитных руд (например, магнетитовых кварцитов). Текстурное строение ряда железных руд требует тонкого измельчения руды для раскрытия сростков, что обуславливает применения мокрого обогащения.

Для обогащения указанных руд применяют барабанные сепараторы со слабым полем типа ПБМ. При этом магнитные системы представлены в последних конструкциях металлокерамическими магнитами. Конструктивно разновидности данных сепараторов имеют аналогичный барабан с магнитной системой, полюса которой чередуются по поверхности барабана, что обеспечивает бегущее магнитное поле, способствующее получению относительно чистых концентратов.

Основное отличие данных сепараторов определяется типом ванны, комплектующей с барабаном сепаратора. Типы ванн рассмотрены в раздел 4.7.

Конструктивная схема сепараторов с различными типами ванн показана на рис. 5.11 – 5.13.



Здесь обозначено: (1) – приемная коробка, (2) – барабан, (3) – привод с редуктором, расположенный внутри барабана, (4) – металлокерамические магнитные полюса, (5) – приемная коробка для магнитного продукта, (6) – регулирующий выпускной клапан немагнитного продукта.

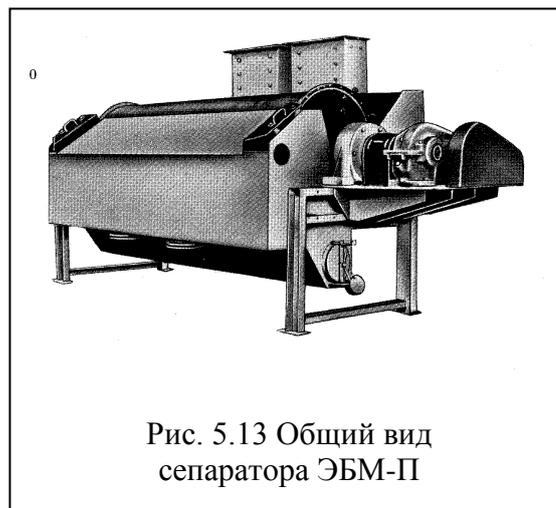
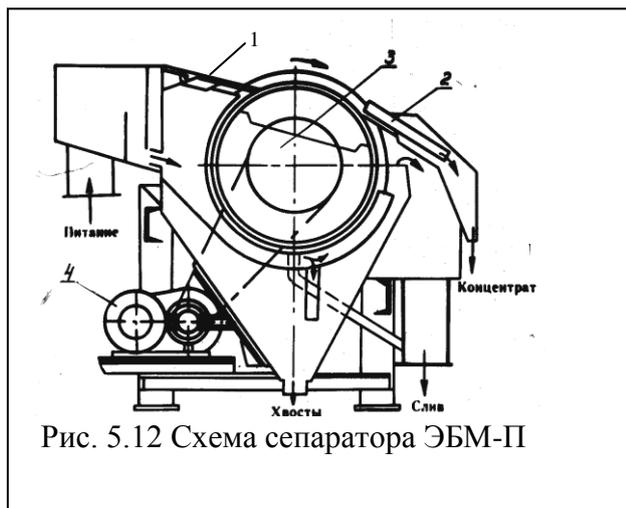
Технологические испытания показали, что на первой стадии обогащения магнетитовых кварцитов можно использовать сепараторы с прямоточной ванной, однако и на этой стадии сепарации противоточные сепараторы работают с большей производительностью. В последних двух стадиях сепарации рекомендуется устанавливать сепараторы с ПП-ванной, что обеспечивает более полное извлечение тонкозернистых фракций магнетита.

В промежуточных стадиях магнитной сепарации рекомендуется устанавливать сепараторы с П-ванной.

Последние конструкции сепараторов типа ПБМ-П-200/250 обеспечивают их производительность до 350 – 400 т/ч по исходному.

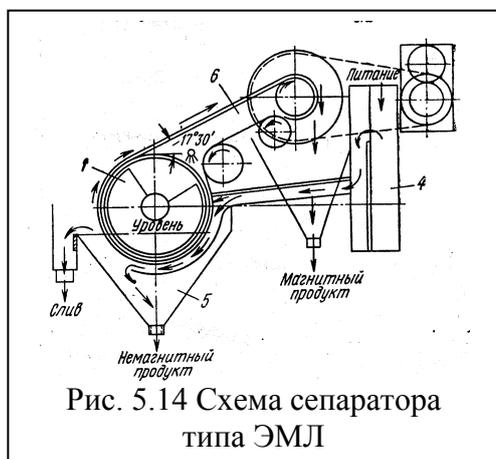
5.3.2 Сепараторы для регенерации ферромагнитных суспензий

Для регенерации ферромагнитных суспензий при гравитационном обогащении используют барабанные магнитные сепараторы с большой длиной рабочей зоны, обеспечивающей более полное извлечение ферромагнитного наполнителя (чаще всего – магнетита).



На рис. 5.12 и 5.13 показаны схема и общий вид сепаратора типа ЭБМ-П. Обозначено: (1) – отжимной лист, (2) – очищающий скребок, (3) – барабан с магнитными полюсами, чередующимися по оси барабана, (4) – привод барабана.

Сепаратор имеет электромагнитную систему, состоящую из 4-х секторообразных полюсов, закрепленных на неподвижном валу и чередующихся по оси барабана. Внутренняя полость барабана заполнена трансформаторным маслом для охлаждения обмоток. Для повышения извлечения магнетита барабан сепаратора погружен в суспензию ниже своей оси. Поэтому торцевые стенки ванны сепаратора имеют специальные уплотнительные устройства, предотвращающие попадание суспензии в полость подшипников.



Магнитные полюса имеют большой угол охвата, что позволяет удерживать магнетит на верхней части барабана, где он обезвоживается с помощью отжимного листа (1) и снимается в виде коржа очищающим скребком (2).

На рис. 5.14 показана схема ленточного (барабанно-ленточного) сепаратора, служащего для целей регенерации суспензии. Работа сепаратора понятна из схемы, лента служит для транспортирования магнетита на небольшое расстояние, что может способствовать лучшей компоновке оборудования. Данные сепараторы заменяются на более технологичные – барабанные.

5.4 Электромагнитные сепараторы с сильным полем

5.4.1 Сепараторы для сухого обогащения

Сепаратор 6ЭВС-В-10/80. Шестивалковый сепаратор с верхней подачей материала. Служит для обогащения слабомагнитных руд крупностью до 6, лучше до 3 мм, для доводки концентратов руд редких металлов. Может применяться и для

очистки сырья от магнитных включений. Производительность – 2 – 3 т/ч. Масса сепаратора - 6.5 т.

Состоит (рис. 5.15) из 2-х параллельно работающих секций, каждая из которых включает последовательно установленных 3 валка. Напряженность в рабочей зоне нижних валков – до 1400 кА/м, верхний валок каждой секции служит для удаления сильномагнитных минералов, способных к забиванию зазора нижних валков. Поэтому напряженность на нем намного ниже (нет противопоставленного полюса).

На рисунке обозначено: (1) – электромагнитная система, (2) – обмотка, (3) – валки, (4) – барабанный питатель, (5 и 6) – приемники для магнитного и немагнитного продуктов соответственно).

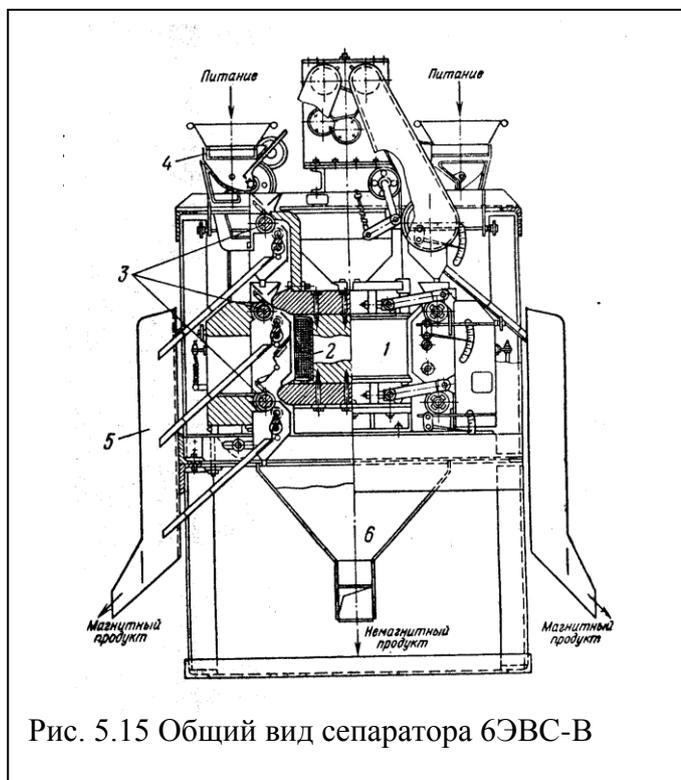


Рис. 5.15 Общий вид сепаратора 6ЭВС-В

нитного и немагнитного продуктов соответственно).

Сепаратор 2ЭВС-36/100. Двухвалковый электромагнитный сепаратор с нижней подачей материала. Производительность по исходному до 12 т/ч.

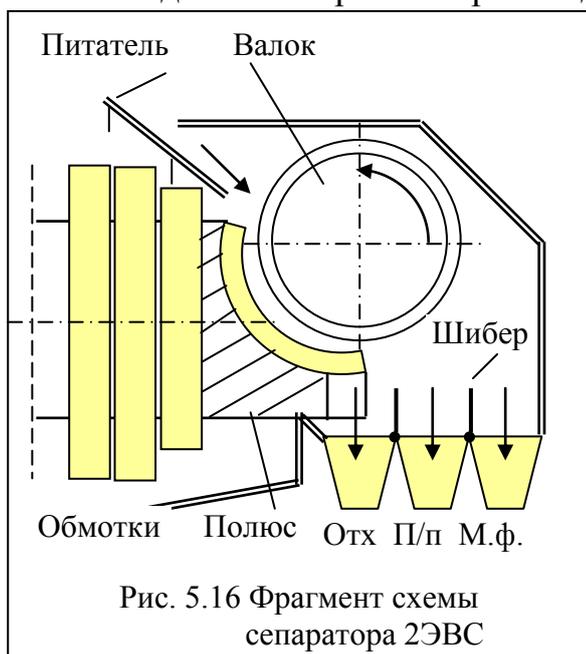


Рис. 5.16 Фрагмент схемы сепаратора 2ЭВС

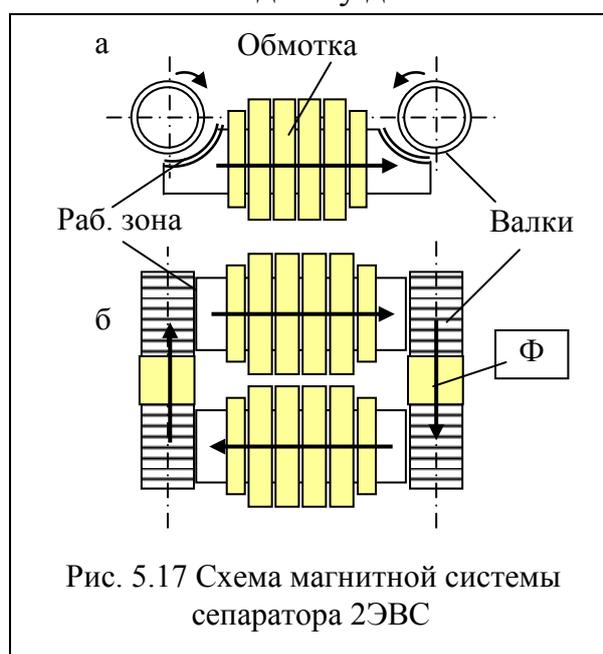
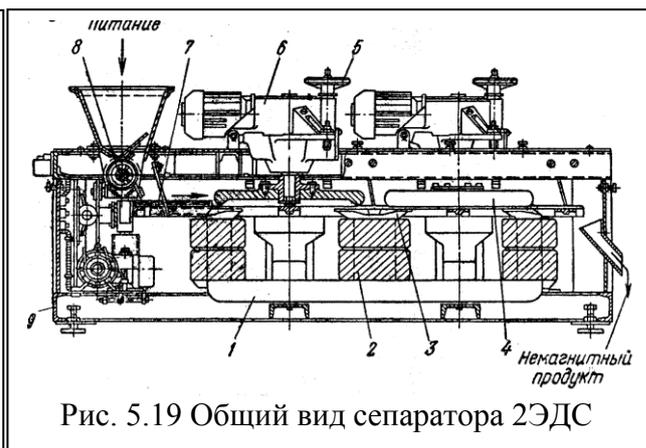
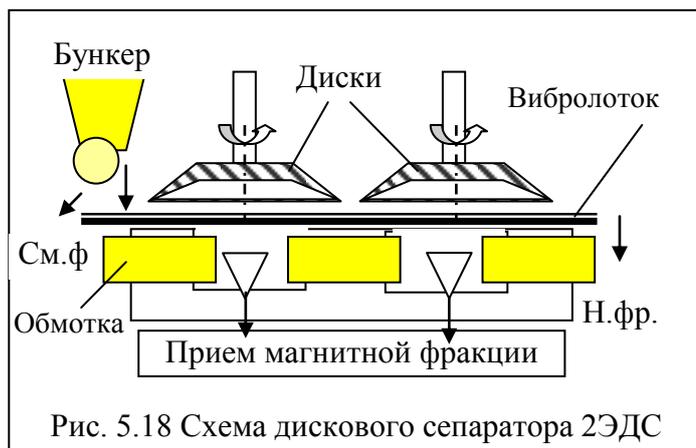


Рис. 5.17 Схема магнитной системы сепаратора 2ЭВС

Предназначен для обогащения слабомагнитных минералов (например, марганцевых руд) крупностью до 3-х мм. Напряженность поля в рабочей зоне сепаратора – 1400 кА/м. Сепаратор имеет 4 рабочих зоны (рис. 5.16 и 5.17), образованных двумя валками и четырьмя полюсами. Магнитный поток ("Ф", рис. 5.17б) замыкается по О-образному контуру с минимальными потерями.

Полюсные наконечники имеют продольные щели для облегчения выгрузки немагнитной фракции. Приемники продуктов снабжены поворотными шиберами, что позволяет регулировать качество продуктов.

Дисковый сепаратор 2ЭДС-60/40. Применяется для доводки концентратов руд редких металлов крупностью до 2-х мм. Производительность до 0.5 т/ч. Масса



сепаратора 1.65 т. Напряженность поля в рабочих зонах – 1400 кА/м.

Содержит 2 диска диаметром 400 мм (рис. 5.18), Ш-образный сердечник с обмотками, вибрационный лоток шириной 600 мм. Питающий бункер снабжен барабанным питателем с магнитной системой (на рис. не показана). Это позволяет улавливать сильномагнитную фракцию на входе в рабочую зону сепаратора.

Рабочие зоны образованы острой кромкой диска (непрерывный зуб) и плоским наконечником магнитопровода. Таким образом сепаратор имеет 4 рабочие зоны. Магнитная фракция, притянувшись к зубу диска, выносится им за пределы магнитного поля (диаметр диска меньше ширины лотка), где сбрасывается в приемники магнитной фракции, расположенные с двух сторон сепаратора.

5.4.2 Сепараторы для мокрого обогащения

Сепараторы типа ЭВМ.

Получили широкое применение для мокрого обогащения измельченных слабомагнитных руд. Это сепараторы типа 2ЭВМ, 4ЭВМ различных типоразмеров.

Принцип работы данных сепараторов аналогичен рассмотренным выше типа ЭВС. Но вместо шиберов и лотков сепараторы имеют ванны и патрубки.

На рис. 5.20 и 5.21 показаны разрез и фрагмент общего вида сепаратора 4ЭВМ. Сепаратор имеет две параллельно работающие секции, каждая из которых содержит два последовательно включенных валка, нижний служит для переобогащения немагнитной фракции верхнего валка. Работа сепаратора ясна из рис. 5.20.

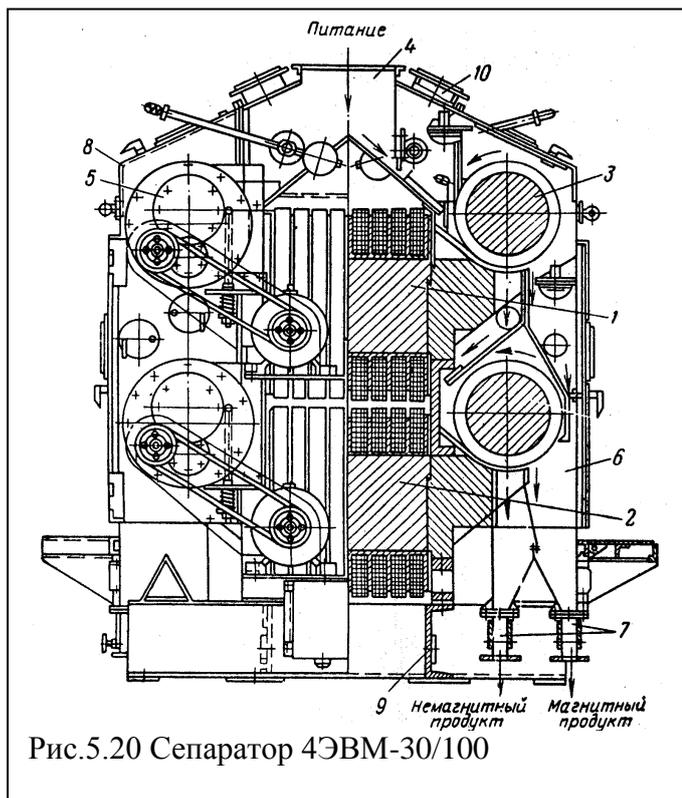


Рис.5.20 Сепаратор 4ЭВМ-30/100

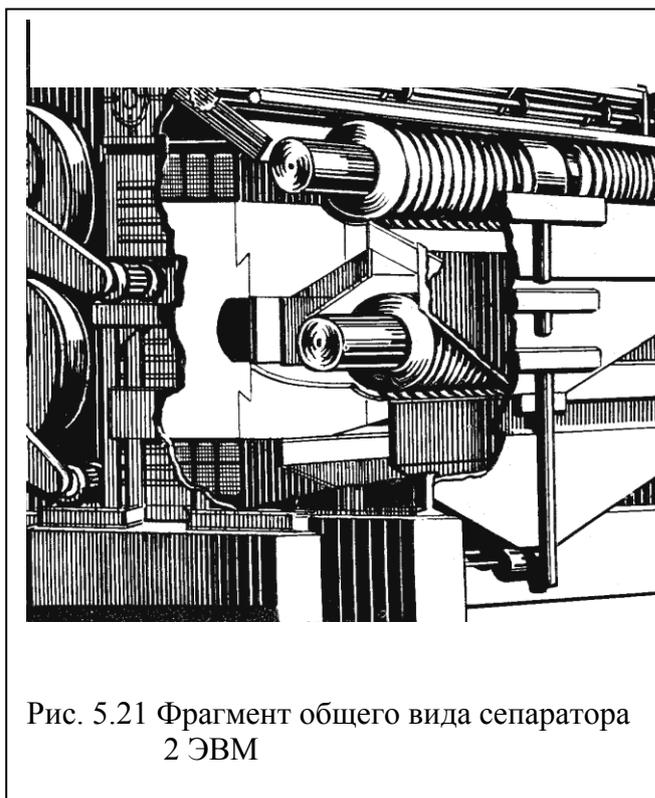


Рис. 5.21 Фрагмент общего вида сепаратора 2 ЭВМ

Полиградиентные сепараторы.

В последние годы получили распространение полиградиентные (высокоградиентные) сепараторы. Отличаются от обычных сепараторов наличием в объеме рабочей зоны полиградиентной ферромагнитной среды (матрицы), образованной металлическими шарами, пластинами с рифлениями на поверхности и пр.

Особенностью данной среды является наличие высокого градиента поля вблизи соприкасающихся элементов наполнителя. Это позволяет получить значительную магнитную силу при невысокой напряженности поля.

Сепаратор ЭБШМ 120/250. Опытная конструкция, испытана при обогащении окисленных магнетитовых кварцитов. Схема представлена на рис. 5.22, общий вид – 5.23.

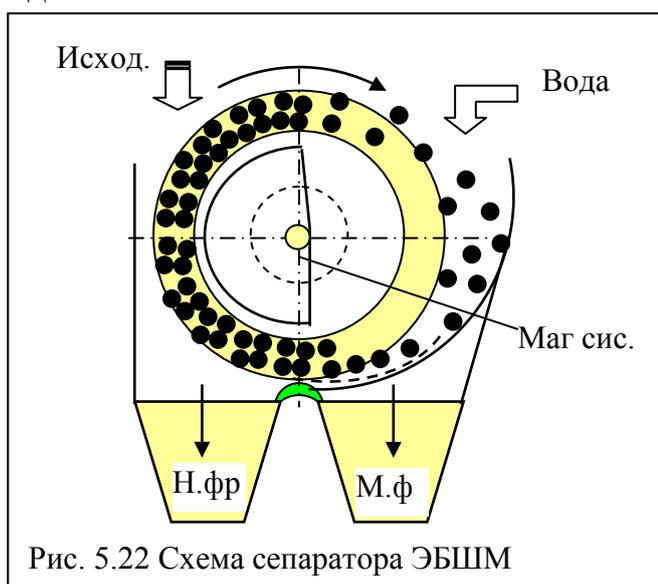


Рис. 5.22 Схема сепаратора ЭБШМ

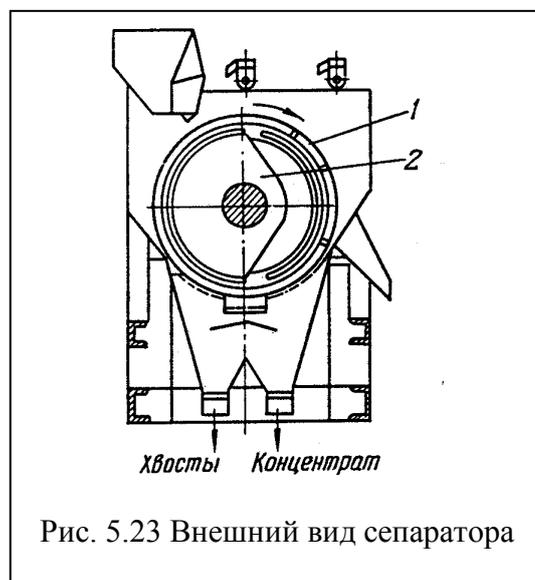
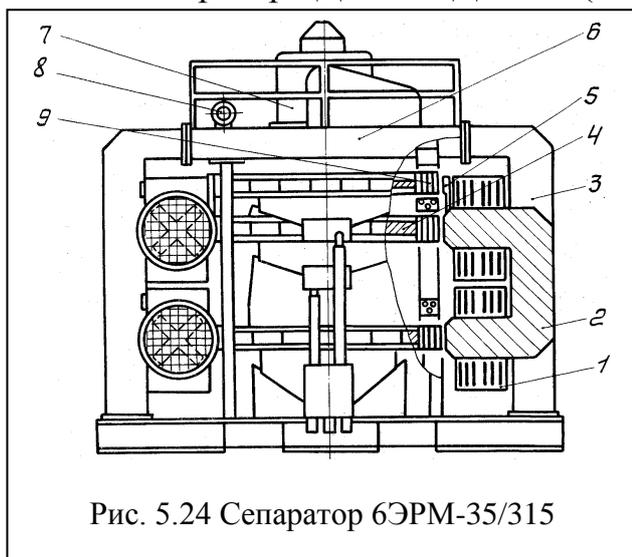


Рис. 5.23 Внешний вид сепаратора

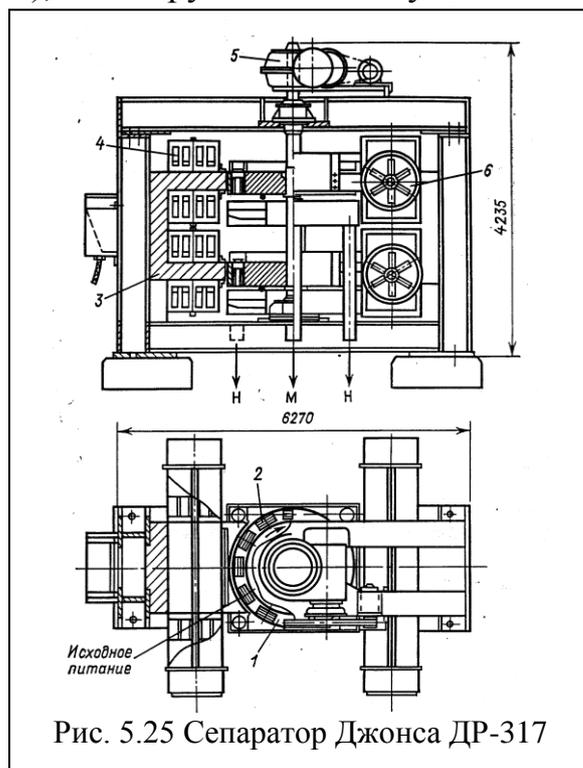
Полиградиентная среда образована здесь с помощью металлических шаров. Они, удерживаясь на поверхности барабана с помощью секторного электромагнита (слева на рис.), служат "фильтром" для немагнитных частиц, которые проходят через зазоры между шарами и выгружаются с суспензией. Магнитные частицы притягиваются к шарам вблизи точек их контактов между собой и вместе с шарами транспортируются барабаном в правую часть сепаратора. Здесь магнитные частицы водой смываются с поверхности шаров, (поле отсутствует) и выгружаются через шпальтовое сито в нижней части ванны. Очищенные шары скатываются в зону действия магнитного поля и втягиваются им вновь на поверхность барабана. Таким образом осуществляется регенерация (восстановление) полиградиентной среды.

Опытный сепаратор обеспечивает обогащение окисленных магнетитовых кварцитов с производительностью до 50 т/ч.

Роторные высокоградиентные сепараторы. Более совершенная конструкция сепаратора с высокоинтенсивным полем разработана институтом "Гипромашуглеобогащение" (Рис.5.24). Предназначен для обогащения окисленных магнетитовых кварцитов, прошел успешные испытания. В основе конструкции лежит схема известного сепаратора Джонса ДР-317 (Рис. 5.25), в которую внесены существенные



изменения. Сепаратор содержит две электромагнитные системы (3), каждая из которых состоит из магнитопровода (2) с катушками (1) и дополнительного верхнего полюса (5). Между системами размещен блок роторов (4). На верхней раме (6) расположены привод (7) и два питателя (8). Сепаратор снабжен брызгалами и устройствами для приема продуктов обогащения. По окружности каждого ротора расположены блоки зубчатых ферромагнитных пластин (9), образующих полиградиентную среду. Пульпа питателями подается на верхний ротор и походит по зазорам между пластинами. Магнитные частицы притягиваются к зубьям пластин и выносятся ими из зоны магнитного поля и смываются водой. Прошедшая по зазорам пульпа поступает на нижележащий ротор и процесс обогащения повторяется. Верхний ротор (с пониженной напряженностью поля) служит для извлечения частиц с повышенными магнитными свойствами.



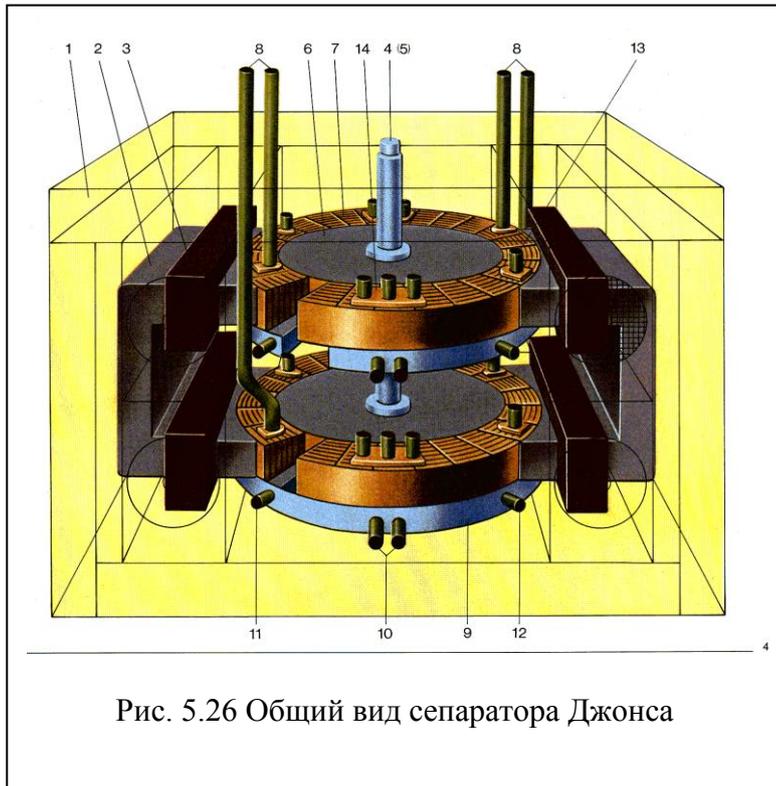


Рис. 5.26 Общий вид сепаратора Джонса

Сепаратор достиг производительности при обогащении окисленных железистых кварцитов 100 т/ч. Масса сепаратора 6500 кг.

На рис. 5.26 показан разрез сепаратора Джонса, где иллюстрируется принцип его действия.

Схема данного сепаратора аналогична рассмотренной выше (6ЭРМ), отсутствует только верхний ротор.

5.5. Вспомогательное оборудование

5.5.1 Аппараты для намагничивания и размагничивания руд

Выше было указано, что в процессе магнитной сепарации сильномагнитных руд необходимо либо усилить явление магнитной флокуляции, либо ослабить. Для этих целей служат специальные, простые по конструкции аппараты.

Намагничивающие аппараты. Служат для усиления магнитной флокуляции перед операциями сгущения, обесшламливания, фильтрации. Аппараты содержат постоянную магнитную систему, закрепленную по оси патрубка с фланцем (Рис. 5.27).

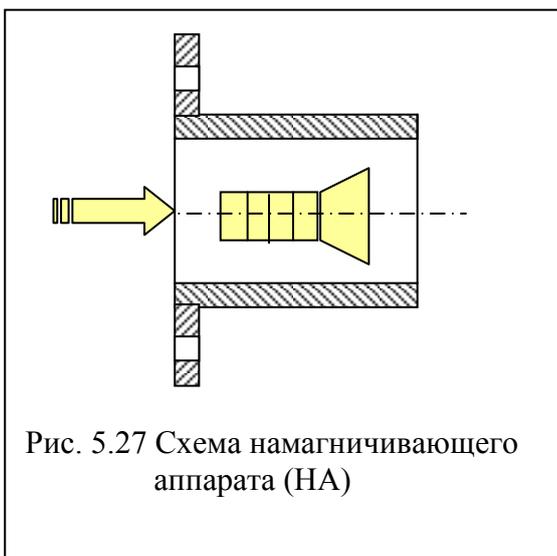


Рис. 5.27 Схема намагничивающего аппарата (НА)

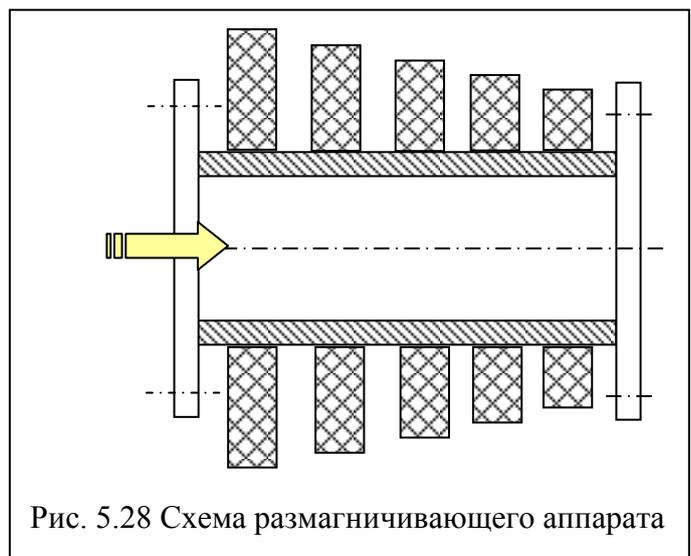


Рис. 5.28 Схема размагничивающего аппарата

Намагничивающие аппараты выпускаются для трубопроводов различных диаметров (диаметр 75 – 200 мм).

Размагничивающие аппараты (рис 5.28). Служат для размагничивания суспензии перед операцией гидравлической классификации. Размагничивание магнетитовых частиц осуществляется при многократном циклическом перемагничивании в переменном магнитном поле (рис. 5.28). Частота тока обмоток – 50 Гц. Напряженность поля на входе в аппарат должна составлять 36 – 40 кА/м, градиент напряженности поля – не более 30-35 кА/м². Полость намагничивающего аппарата может заполняться трансформаторным маслом для охлаждения.

5.5.2 Магнитные дешламаторы.

Служат для обесшламливания и сгущения тонкоизмельченного сильномагнитного материала перед последующей стадией сепарации или в качестве заключительной операцией перед обезвоживанием.

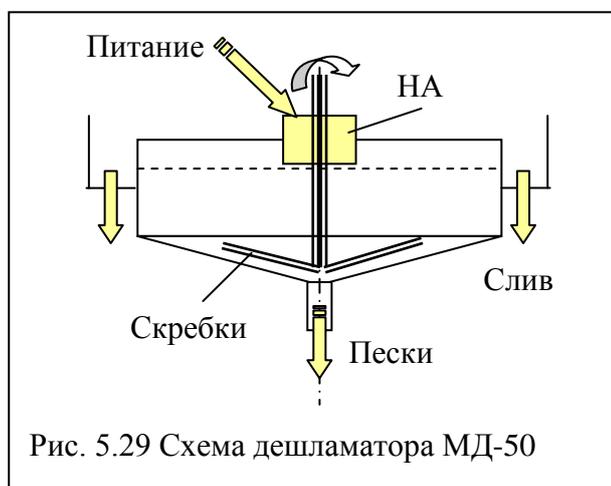


Схема дешламатора представлена на рис. 5.29. Представляет собой цилиндрическую емкость, снабженную намагничивающим аппаратом, переливным порогом и устройством выгрузки сгущенного продукта (пески). Выгрузка осевшего продукта осуществляется через нижний клапан, к которому продукт подается с помощью скребков, закрепленных на вращающейся ферме.

В песках концентрируются магнитные флоккулы, в сливе – тонкие немагнитные частицы (шламы).

6. ПОДГОТОВКА РУД К МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

Подготовка руд к магнитной сепарации включает следующие операции:

- дробление и измельчение;
- грохочение;
- обесшламливание и обеспыливание;
- намагничивание и размагничивание;
- сушка;
- обжиг.

Операции *дробления и измельчения* служат для подготовки руды по классам крупности и рассмотрены в курсе "Подготовительные процессы".

Грохочение, как самостоятельная операция, применяется при обогащении сильномагнитных руд и служит для выделения классов крупности, для которых отсутствует явление равнопритягиваемости при сухой сепарации. Например, при сухой сепарации магнетитовых руд крупностью 0 – 50 мм или 0 – 25 мм рекомендуется предварительное разделение их на классы > 6 мм и < 6 мм.

Обесшламливание и обеспыливание – это удаление из исходной руды тонких нерудных частиц, негативно влияющих на селективность обогащения. Следует правильно выбирать граничную крупность частиц, удаляемых при данных операциях. При обогащении сильномагнитных руд рекомендуется удаление частиц крупностью менее 5 мкм, при сепарации слабомагнитных руд – менее 10 мкм.

Размагничивание и размгничивание операции, применяющиеся для усиления либо подавления процессов магнитной флокуляции в процессе обогащения сильномагнитных руд (рассмотрены выше).

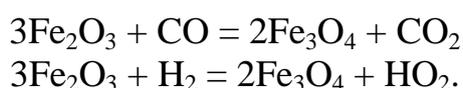
Сушка – как предварительная (подготовительная) операция применяется перед сухой магнитной сепарацией слабомагнитных руд. Это связано с тем, что поверхностная влага руды оказывает негативное влияние на селективность сухой сепарации, причем в тем большей степени, чем мельче материал. Например, содержание влаги при сухой сепарации редкометалльных руд крупностью (0,3 – 0) мм не должно превышать 0,5 %. При влажности (2 – 2,5)% процесс полностью нарушается. В то же время марганцевая руда крупностью (3 – 0) мм удовлетворительно обогащается при влажности до 5 %.

Процесс термической сушки требует значительных материальных затрат, следовательно, важно определить допустимый предел содержания влаги для каждой конкретной руды.

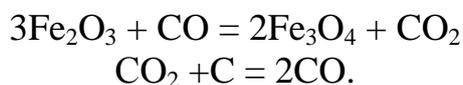
Сушка осуществляется в барабанных сушильных установках, трубах-сушилках либо в кипящем слое.

Обжиг – это термический процесс взаимодействия компонентов руды с целью изменения их химического (минералогического) состава. Одним из видов обжига является **магнетизирующий обжиг**, которому подвергаются железные руды для перевода слабомагнитных окислов железа в сильномагнитные – искусственный магнетит или маггемит.

Восстановление гематита в магнетит может производиться газообразными или твердыми восстановителями. В первом случае реакция происходит по схемам:



При твердом восстановителе:



Обжиг гематитов производится в барабанных вращающихся печах при температуре 850-950⁰ С.

В настоящее время, в связи с высокой стоимостью теплоносителей, для обогащения слабомагнитных железных руд рационально использовать перспективные сепараторы с высокоградиентным магнитным полем.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ОБОГАЩЕНИЯ

1 Введение

1.1 Сущность электрических методов обогащения.

Электрическое обогащение основано на применении различия в электрических свойствах разделяемых минералов. К этим свойствам относятся: *электропроводность, диэлектрическая проницаемость, проявление эффектов - трибоэлектрического, контактного потенциала, пирозлектрического.*

Сущность электрической сепарации заключается во взаимодействии электрического поля и минеральной частицы, обладающей определенным зарядом. Заряд частицы получают искусственно одним из способов, выбираемым в зависимости от их наиболее контрастных электрических свойств. Электрическая сепарация осуществляется как в однородном, так и в неоднородном электрическом поле.

Диэлектрическая сепарация может осуществляться только в неоднородном электрическом поле, где возникают пондеромоторные силы, зависящие от диэлектрической проницаемости среды и разделяемых минералов.

Обогащения производится в электрических или диэлектрических сепараторах.

1.2 Область применения электрических методов обогащения

Электрическая сепарация применяется для обогащения зернистых материалов крупностью от 3 до 0.05 мм, обогащение которых другими методами малоэффективно либо экономически нецелесообразно.

Область применения данных методов весьма обширна. Это - обогащение кварца, граната, алмазов, вольфрамовых, фосфоритовых, касситеритовых, танталонийобиевых, титаносодержащих руд и россыпных песков.

Например, при обогащении вольфрамитовых руд крупностью 0.1 – 1.5 мм с содержанием вольфрамита в исходном 1.5 % получают концентрат с содержанием вольфрамита 33 – 35 % при извлечении до 97 %.

Методы применяются и при доводке коллективных концентратов таких, как титано-цирконовых, ильменито-рутило-цирконо-моноцитовых, танталонийобиевых, танталит-колумбитовых, оловяно-вольфрамовых и др.

Например, из первичного танталонийобиевого концентрата электрическими методами (совместно с магнитными) извлекают танталит (тантал), колумбит (ниобий), монацит (торий, цезий), циркон (цирконий, гафний, торий), касситерит (свинец), берилл (бериллий, изумруд, аквамарин), гранат и пр.

Электрические методы нашли применение и при сухой классификации материалов по крупности, например, при обеспыливании и классификации строительных и кварцевых песков, вермикулита, различных солей, металлических и неметаллических порошков и пр.

2 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОГАЩЕНИЯ

2.1 Общие сведения.

Электрическое поле – форма существования материи вблизи электрических зарядов. Более конкретно – это пространство, в котором проявляется действие электрических сил на заряженные частицы.

Основная характеристика электрического поля – *напряженность* (E). Напряженность поля в точке – это величина, равная отношению силы, с которой поле действует на положительный заряд, помещенный в данную точку, к величине этого заряда, т.е. $E = F/Q$ [Н/Кл; В/м].

Электрическое поле, как и магнитное, может быть однородным (рис.1.1а) и неоднородным (рис.1.1б). Неоднородность поля характеризуется градиентом: $gradE = dE/dx$. Для однородных электрических полей $gradE = 0$.

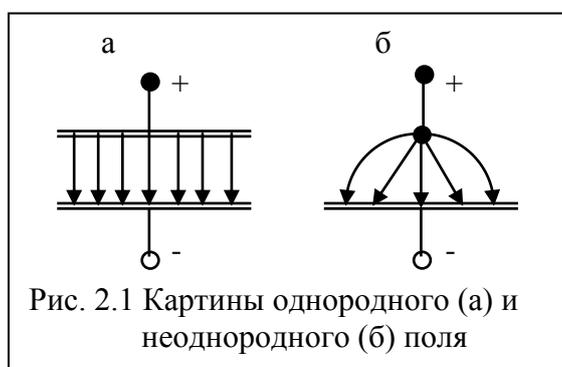


Рис. 2.1 Картины однородного (а) и неоднородного (б) поля

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

Диэлектрическая проницаемость вещества (ϵ_a) характеризует поляризуемость диэлектрика.

Вспомним и о понятии абсолютной диэлектрической проницаемости (ϵ_a), которая оценивается: $\epsilon_a = \epsilon \epsilon_0$, где ϵ_0 – электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Одна из основных электрических характеристик веществ – электропроводность (единица измерения – Сименс), либо *удельная электропроводность* (единица измерения – См/м). Последний показатель – величина, обратная удельному сопротивлению.

По электропроводности все минералы классифицируются на 3 группы:

1. *Проводники (П)* – удельная электропроводность $10 - 10^4$ См/м.
2. *Полупроводники (ПП)* – удельная электропроводность $10^{-1} - 10^{-8}$ См/м.
3. *Непроводники (НП)* – удельная электропроводность $< 10^{-8}$ См/м.

Величина электропроводности складывается из объемной и поверхностной составляющей. Последняя зависит от состояния поверхности. Путем нанесения на поверхность реагентов в виде аэрозолей можно целенаправленно изменять проводимость минералов в нужном направлении.

К минералам проводниковой группы относятся магнетит, титаномагнетит, ильменит, рутил, пирит, галенит, графит и другие минералы.

К полупроводникам относятся доломит, гематит, псиломелан, халькопирит, молибденит, вольфрамит, сфалерит и пр.

К непроводникам относятся кварц, циркон, турмалин, асбест, боксит, пироксид и другие минералы.

В электрическом поле минералы проводниковой и непроводниковой группы ведут себя различно.

На поверхности проводника, помещенного в электрическое поле, появляются электрические заряды, причем на одном конце концентрируется избыток электронов (вблизи положительного электрода), на другом – наблюдается их недостаток, т.е. появляется положительный заряд. Это явление связано с переходом электронов от атома к атому на верхних орбитах их движения. При удалении проводника из поля восстанавливается первоначальное состояние.

При контакте проводника с заряженным телом (электродом) происходит обмен зарядами, проводник приобретает одноименный заряд и испытывает силы отталкивания от электрода.

Помещение в электрическое поле непроводника (диэлектрика) сопровождается смещением в нем зарядов (переориентацией электрических диполей в соответствии с направлением напряженности электрического поля). На концах диэлектрика также появляются заряды, но при контакте с электродом переход зарядов невозможен, кулоновские силы притягивают непроводник к электроду.

2.2 Способы зарядки минеральных частиц

Зарядка (электризация) частиц – важнейшая стадия электрической сепарации. Она может осуществляться путем создания на частицах избыточных зарядов какого-либо одного знака, либо создания на противоположных концах частицы зарядов разного знака. Существует несколько способов зарядки частиц.

2.2.1 Зарядка касанием об электрод

При соприкосновении проводниковой частицы (П) с электродом, находящимся под электрическим потенциалом, происходит перераспределение зарядов, в результате которого частица приобретает избыточный одноименный с электродом заряд. Это сопровождается появлением электрических кулоновских сил отталкивания (рис. 2.2).

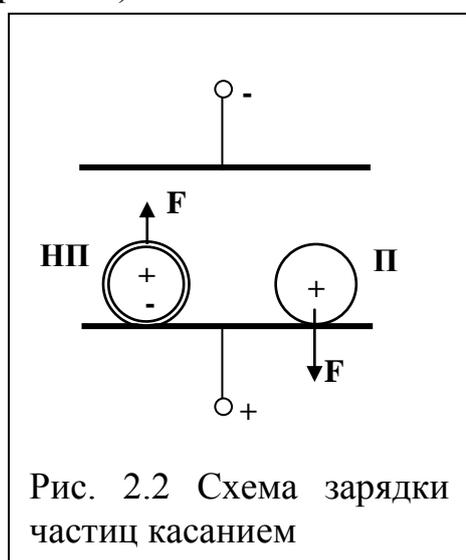


Рис. 2.2 Схема зарядки частиц касанием

Частица непроводника (НП) поляризуется и притягивается к нижнему электроду.

Скорость зарядки (или разрядки) частиц зависит от их электрической проводимости, формы, контактного сопротивления, напряженности поля и пр.

Для проводника, имеющего форму шарика с радиусом "r", касающегося электрода в постоянном электрическом поле с напряженностью "E" предельная величина заряда равна:

$$q = 1.83 \cdot 10^{-10} E \cdot r^2 \quad (2.1)$$

2.2.2 Зарядка частиц ионизацией

Сущность метода заключается в осаждении на поверхность частиц ионов газа, полученных одним из способов – коронный разряд, рентгеновское, радиоактивное воздействие.

Наиболее распространенный источник получения ионов – *коронный разряд*. Сущность ионизации газа состоит в отщеплении электронов от нейтральных молекул и в присоединении некоторой части свободных электронов к нейтральным молекулам и атомам газа. Таким образом, носителями электрических зарядов в ионизированном газе являются ионы различных знаков и свободные электроны.

Коронный разряд – это неполный пробой газа между электродами, возникающий вблизи тонкого или заостренного электрода. В результате частичного пробоя ионизируются молекулы воздуха. Под влиянием электрического поля мощный поток газообразных ионов движется от коронирующего электрода к заземленному (осадительному) электроду. Возникающее в этом случае свечение газа – результат возбуждения нейтральных молекул, с которыми сталкиваются электроны или ионы.

Электрод, вблизи которого возникает свечение газа, называется *коронирующим*, а светящаяся область – коронирующим слоем или чехлом короны. Коронирующий слой образует внутреннюю область коронного разряда. Во внешней области ионизация газа не происходит, имеет место лишь перемещение в определенном направлении молекул газа под действием движущихся ионов. Эти ионы образуют "электронный ветер", он выравнивает концентрацию ионов в межэлектродном пространстве, способствуя лучшей зарядке частиц минерала.

Внешняя часть коронного разряда имеет только зарядоносители одного знака, т.к. коронирующий электрод поглощает ионы противоположного с ним знака, а избыточные одноименно заряженные ионы выталкиваются во внешнюю область короны и направляются к противоположному электроду. **Следовательно**, электрический ток при коронном разряде образуется зарядами того же знака, какой имеет коронирующий электрод.

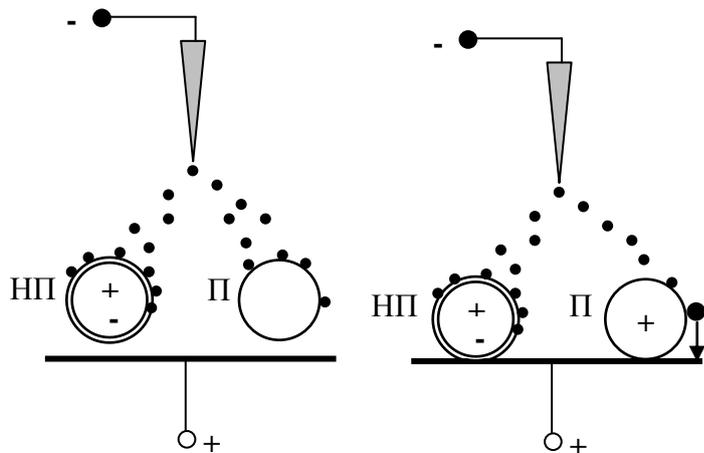


Рис. 2.3 Схема зарядки частиц в поле коронного разряда

- отрицательно заряженный ион

Различают положительную и отрицательную корону, что определяется знаком потенциала коронирующего электрода.

Напряженность электрического поля и напряжение на электроде, при которых происходит коронный разряд в газе, называют *критической напряженностью и критическим напряжением*.

Напряжение, при котором наблюдается возникновение искр, называют *напряжением искрового пробоя*, а при котором возникает электрическая дуга – *напряжением пробоя*.

В поле коронного разряда возможна зарядка частиц, как находящихся во взвешенном состоянии в воздушном потоке, так и расположенных на электроде. На рис. 2.3 (схема слева) показан заряд частиц, находящихся в воздушном потоке, отрицательными ионами. Здесь верхний электрод называется коронирующим, нижний – осадительным.

Максимальный заряд, который может получить частица сферической форма с радиусом "r" в **воздушной среде** оценивается формулой Потенье:

$$Q_{\max} = 4\pi\epsilon_0 r^2 E \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right), \quad (2.2)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная;

ϵ – диэлектрическая проницаемость частицы;

E – напряженность электрического поля.

При контакте с заряженным электродом (схема справа) проводниковые частицы отдают полученный заряд, приобретая положительный заряд, а непроводники – нет. Скорость разряда частиц при касании об электрод определяется их проводимостью, контактным сопротивлением. За счет различной кинетики разряда частиц возникает разница в остаточной зарядки П- и НП-частиц.

Это явление сопровождается появлением сил отталкивания для частиц первого рода (П) и притяжения – для частиц второй группы (НП).

Рассмотренный способ ионизации частиц в коронном разряде с последующим контактом с электродом – основной метод зарядки разделяемых частиц при электрической сепарации по электропроводности.

2.2.3 Зарядка частиц трением

Метод основан на трибоэлектрическом эффекте, свойственном многим минералам. Иногда называется методом контактной электризации.

Сущность трибоэлектрического эффекта – возникновение зарядов на частицах минералов при прерывании механического контакта между ними, либо при трении частиц между собой. Другими словами, если электрически нейтральную частицу минерала привести в соприкосновение с электрически нейтральной частицей другого минерала или с поверхностью какого-либо материала и затем разъединить их, то на обоих соприкасающихся веществах возникнут различные по знаку электрические заряды. При многократном повторении рассмотренного элементарного акта удастся создать плотность поверхностного заряда, достаточную для сепарации минералов в электрическом поле высокой напряженности.

Реализация данного метода зарядки частиц возможна двумя способами:

1. Контакт всех разделяемых минералов с электризатором, обычно вибрационным лотком, обеспечивающего многократное соприкосновение частиц с его поверхностью в процессе их перемещения.

2. Контакт разделяемых частиц между собой при перемешивании их во вращающемся барабане, обеспечивающим интенсивное соударение минералов.

Первый способ обеспечивает более высокую селективность зарядки частиц путем подбора материала электризатора. Но этому способу характерна малая производительность, т.к. на вибролотке необходимо обеспечивать монослой материала.

Второй метод имеет более высокую производительность, но ограничен в селективности зарядки.

Рассмотренный метод зарядки частиц лежит в основе трибоэлектрической сепарации.

2.3 Виды электрической сепарации

2.3.1 Электрическая сепарация по электропроводности

В основе сепарации минералов лежит различие в электропроводности разделяемых минералов. Чем выше контрастность этих свойств, тем эффективнее проходит процесс обогащения. Данный вид сепарации позволяет легко разделять проводники от полупроводников и непроводников. Труднее происходит разделение минералов групп ПП от НП. Практически невозможно разделить минералы, относящиеся к одной группе, если использовать естественное различие электропроводности частиц.

Существуют следующие разновидности электрической сепарации по электропроводности (рис. 2.4):

- электростатическая (схема "а");
- коронная (схема "б");
- коронно-электростатическая (схема "в").

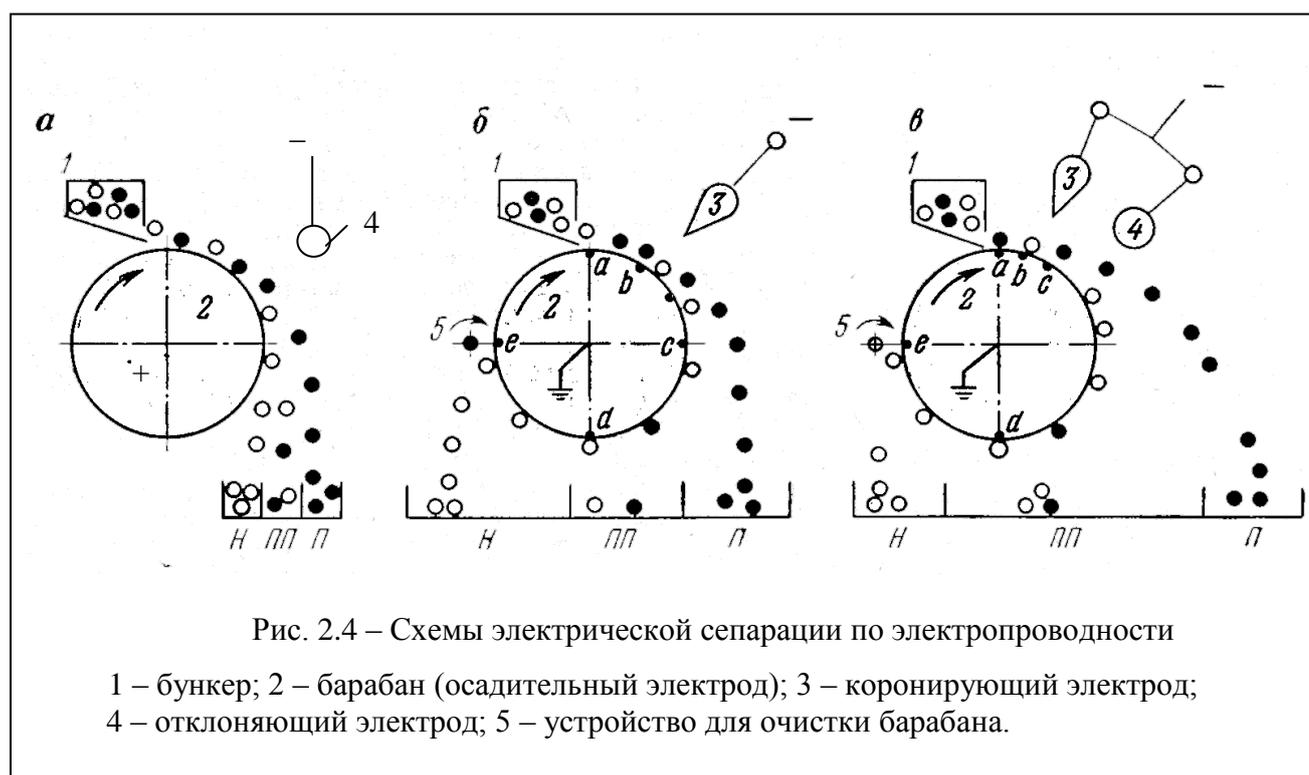


Рис. 2.4 – Схемы электрической сепарации по электропроводности

1 – бункер; 2 – барабан (осадительный электрод); 3 – коронирующий электрод; 4 – отклоняющий электрод; 5 – устройство для очистки барабана.

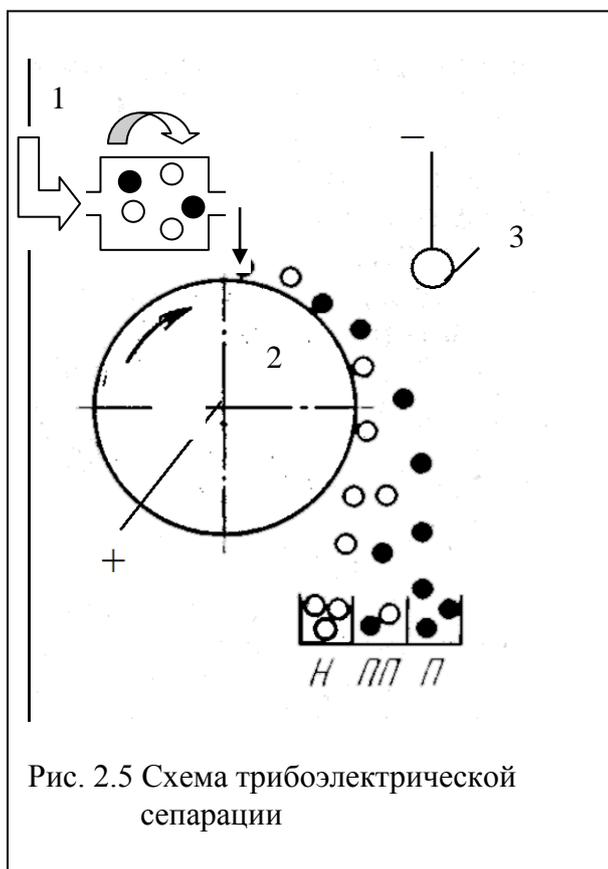
Электростатическая сепарация, на примере барабанного сепаратора (рис.2.4,*а*), включает зарядку частиц касанием об вращающийся электрод (барабан). Проводники, получив заряд от барабана, отталкиваются от него, чему способствует центробежная сила и отклоняющий электрод (4), имеющий потенциал противоположного знака, и собираются в проводниковом отделении. Непроводники, поляризуясь, притягиваются к барабану и разгружаются значительно позже по пути вращения барабана, этому способствует и сила тяжести частиц. Промежуточную траекторию движения получают полупроводники. Данный вид сепарации в чистом виде применяется редко.

Коронная сепарация (схема *б*) основана зарядке частиц в высоковольтном поле коронного разряда, образующегося между коронирующим и осадительным электродами. Здесь все частицы получают отрицательный заряд за счет осевших на их поверхность ионов воздуха. Проводниковая фракция быстро отдает его барабану, перезарядается и отталкивается от него. Непроводники не могут с такой же скоростью отдать свои заряды, они притягиваются к барабану и разгружаются с его поверхности вращающейся щеткой (5).

Коронно-электростатическая сепарация (схема *в*), наиболее широко применяемая в промышленности, включает принципы электростатической и коронной сепарации.

Следует обратить внимание, что чаще используется "отрицательная" корона, это обеспечивается подачей высокого отрицательно напряжения (30 – 50 кВ) на коронирующий электрод (и на отклоняющий), на заземленный барабан в этом случае подается положительный потенциал от высоковольтного выпрямителя.

2.3.2 Трибоэлектрическая сепарация



В основе сепарации лежит зарядка частиц с помощью трибоэлектрического эффекта (см. раздел 2.2.3). Вариант реализации данного способа сепарации показан на рис. 2.5.

По этой схеме зарядка частиц осуществляется во вращающемся барабане (1). Остальные элементы схемы соответствуют электростатическому сепаратору (рис. 2.4,*а*).

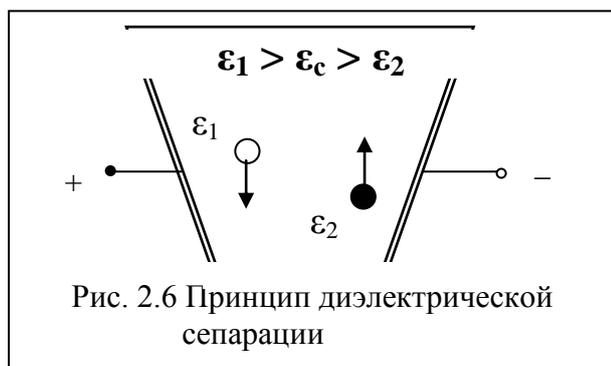
Рассмотренный вид сепарации применяется для разделения минералов, имеющих близкие по значению электропроводности, и относящиеся, как правило, к группам ПП или НП.

Для сепарации тонких классов минералов указанных групп применяют разновидность данного вида – трибоадгезионную сепарацию.

Диэлектрическая сепарация

Способ основан на различии диэлектрической проницаемости разделяемых минералов. Сущность метода базируется на известной закономерности. Она заключается в том, что в *неоднородном* электрическом поле в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ_c частицы с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 > \epsilon_c$ втягиваются в область большей напряженности поля, а частицы с проницаемостью $\epsilon_2 < \epsilon_c$ выталкиваются в область с меньшей напряженностью поля.

Принцип данной сепарации иллюстрируется на рис. 2.6.



Для реализации схемы необходима специальная среда с заданной диэлектрической проницаемостью ϵ_c . Это – жидкости, как правило, искусственные смеси углеводородов, которые необходимо регенерировать. Все это усложняет технологию, в связи с чем, применение данного вида сепарации ограничено.

3 ДИНАМИКА ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ

Процесс электрической сепарации в электрическом поле осуществляется либо за счет *удерживания* заряженных частиц на поверхности заземленного (осадительного) электрода, либо в результате *отклонения* их в сторону электрода с противоположным зарядом. Поэтому в электросепарации различают два режима: **удерживания и отклонения**.

Поведение частиц в электрическом поле, траектории их движения определяются соотношением электрических и механических сил.

3.1 Характеристика действующих на частицы сил

Разделение различно заряженных частиц происходит в результате взаимодействия электрических и механических сил, действующих в рабочей зоне сепаратора, и, как следствие, изменения траектории их движения.

Рассмотрим основные электрические силы, действующие на частицы.

Электрическая кулоновская сила – F_k . Это сила, обусловленная притяжением частицы к противоположному по знаку электроду и отталкиванием ее от одноименно заряженного. Она определяется по выражению:

$$F = QE, \quad (3.1)$$

где Q – заряд частицы, Кл;

E – напряженность электрического поля, В/м.

Сила зеркального отображения – $F_{\text{з}}$. Сила взаимодействия заряда частицы и индуцированного на осадительном электроде электрического заряда, равного по величине, но противоположно по знаку. Сила направлена к электроду и стремится

удержать частицу на нем либо вблизи него. Это разновидность кулоновской силы, она способствует более длительному удерживанию на электроде частиц диэлектрика (НП) по сравнению с П-частицами. Является главной электрической составляющей силы адгезии при трибоадгезионной сепарации. Определяется по выражению:

$$F_3 = \frac{Q_R^2}{l^2}, \quad (3.2)$$

где Q_R - остаточный заряд частицы, Кл;

l - расстояние между центрами зарядов, м

Остаточный заряд частицы зависит от ряда факторов, в том числе от переходного сопротивления в зоне контакта. В воздушной среде она равна:

$$Q_R = 4\pi\epsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\epsilon_q - 1}{\epsilon_q - 2}\right) r^2 E \varphi(R), \quad (3.3)$$

где ϵ_0 - электрическая постоянная;

ϵ_q и r - диэлектрическая проницаемость и радиус частицы;

E - напряженность поля;

$\varphi(R)$ - функция переходного сопротивления, изменяющаяся от 0 до 1.

Пондеромоторная сила - F_n . Возникает в неоднородном электрическом поле и зависит от соотношения диэлектрических проницаемостей частицы и среды. Является определяющей при диэлектрической сепарации (см. 2.3.3).

Определяется выражением:

$$F_n = 4\pi\epsilon_0 \epsilon_c r^3 \frac{\epsilon_q - \epsilon_c}{\epsilon_q + 2\epsilon_c} E \text{grad} E, \quad (3.4)$$

где ϵ_c - диэлектрическая проницаемость среды;

$\text{grad} E$ - градиент напряженности электрического поля.

При рассмотрении сепарации в воздушной среде выражение (3.4) справедливо при $\epsilon_c = 1$.

Трибоадгезионная сила - F_{ad} . Проявляется только при обогащении тонкодисперсного материала (< 30 мкм), когда повышается роль поверхностных (адгезионных) сил. Она определяет адгезию (прилипание) частиц между собой и к другим поверхностям.

По Б.В. Дерягину полная сила адгезии равна:

$$F_{ad} = F_m + F_3, \quad (3.5)$$

где F_m - молекулярная составляющая;

F_3 - электрическая составляющая.

$$F_m = \pi A \sigma d_q, \quad (3.6)$$

где σ - поверхностное натяжение;

d_q - диаметр частицы;

A - постоянный коэффициент.

Электрическую составляющую F_3 можно представить как сумму сил:

$$F_3 = F_{dc} + F_3, \quad (3.7)$$

где $F_{\partial c}$ – сила, обусловленная взаимодействием двойных электрических слоев (ДЭС);

F_3 – сила зеркального отображения (3.2).

Известно выражение:

$$F_{\partial c} = 2\pi\sigma_s^2 S_k, \quad (3.8)$$

где σ_s – поверхностная плотность зарядов ДЭС;

S_k – площадь контакта.

Тогда с учетом (3.2 и 3.8) получим:

$$F_3 = 2\pi\sigma_s^2 S_k + \frac{Q_R^2}{l^2} \quad (3.9)$$

Общая трибоадгезионная сила оценивается выражением:

$$F_{ад} = \pi A \sigma d_{\text{ч}} + 2\pi\sigma_s^2 S_k + \frac{Q_R^2}{l^2} \quad (3.10)$$

Механические силы. Основными механическими силами являются: сила тяжести $F_m = mg$ и центробежная сила $F_{\text{ц}} = mv^2/R$. Силой сопротивления при сепарации в воздушной среде пренебрегаем.

Анализ сил

В качестве вывода предыдущего раздела примем к сведению общую характеристику сил.

1. Кулоновская сила – F_k . Наиболее существенная сила при электрической сепарации. Обуславливает отталкивание объектов, имеющих одноименный заряд, и притяжение – при разноименном заряде. Действует как в однородном, так и неоднородном поле.
2. Сила зеркального отображения – F_3 . Всегда направлена к электроду. Действует только вблизи электрода и при контакте с ним.
3. Пондеромоторная сила – $F_{\text{п}}$. Действует только в неоднородном электрическом поле. Зависит от среды сепарации. Существенна и определяющая при диэлектрической сепарации. При сухом обогащении ее иногда пренебрегают.
4. Трибоадгезионная сила – $F_{\text{ад}}$. Учитывается только при сепарации тонкодисперсных материалов.
5. Механические силы. Основная – центробежная сила, действующая при криволинейном движении рабочего органа сепаратора (например, барабан). Силой тяжести обычно пренебрегают.

Рассмотрим векторную диаграмму сил, действующих на частицу непроводник в случае сухой сепарации на коронно-электростатическом барабанном сепараторе (рис. 3.1). Барабан выполняет роль не только рабочего органа сепаратора, но и служит одним из электродов (осадительный).

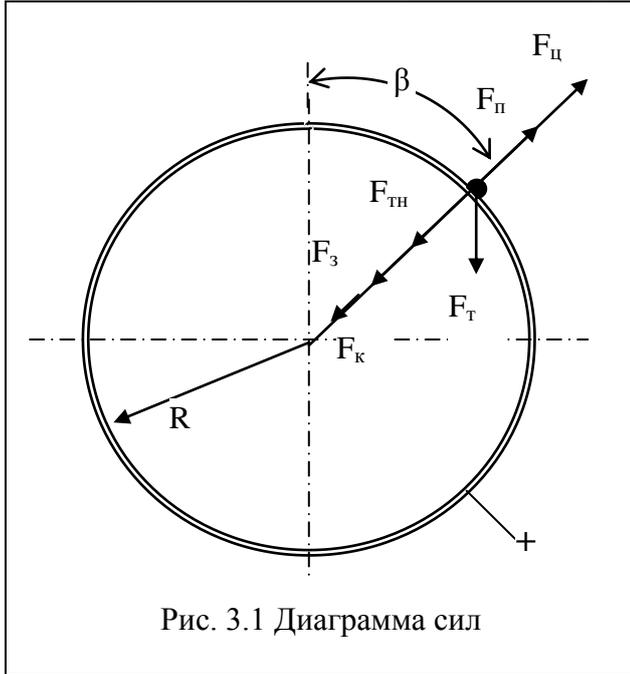


Рис. 3.1 Диаграмма сил

Здесь НП-частица закреплена на поверхности вращающегося барабана под углом β к вертикальной оси. Сила тяжести (F_T) разложена на две составляющие – нормальную $F_{Тн} = mg\cos\beta$ и касательную (на схеме не показана).

Кулоновская сила (F_K) действует к центру барабана, т.к. НП частица, получив от коронного разряда значительный отрицательный потенциал, не отдает его положительно заряженному барабану (вернее медленно разряжается).

Сила зеркального отображения (F_3) всегда прижимает частицу к электроду. Поскольку поле неоднородно (в связи с формой коронирующего и других электродов) можно учесть пондеромоторную силу F_n . Она направлена от центра барабана, так как диэлектрическая проницаемость минералов больше, чем воздуха, а напряженность поля выше вблизи коронирующего электрода (на схеме не показан). Но эта сила настолько мала, что ее можно не учитывать.

Таким образом, для непроводниковой частицы (режим удерживания) баланс действующих сил имеет вид:

$$F_{\Sigma} = F_K + F_3 + F_{тн} - F_n - F_{ц} \quad (3.11)$$

Проведя аналогичный анализ можно получить выражение для действующих сил на проводниковую частицу. Здесь, очевидно действует режим отклонения. Учтем, что кулоновская сила изменит свое направление, т.к. проводники быстро отдают барабану полученный заряд, приобретают одноименный с ним заряд и испытывают силы отталкивания. Остальные силы направление своего действия не изменят. Для проводниковой частицы получим:

$$F_{\Sigma} = F_3 + F_{тн} - F_K - F_n - F_{ц} \quad (3.12)$$

Результирующая сила (F_{Σ}) в обоих случаях определяет траекторию движения частиц. Обратим внимание, что путем увеличения частоты вращения барабана можно изменять соотношение конкурирующих сил (изменяется центробежная сила). Чем она выше, тем чище будет непроводниковая фракция. Высокоскоростной режим барабанных электрических сепараторов не только улучшает технологические показатели, но и повышает их производительность.

4 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕПАРАТОРЫ

4.1 Классификация сепараторов и общие сведения

Классификация электрических сепараторов осуществляется по следующим признакам: по способу сепарации и по характеру движения материала (конструктивный признак).

В свою очередь первая группа сепараторов классифицируется на виды:

- электростатические;
- коронные;
- коронно-электростатические;
- трибоэлектростатические;
- диэлектрические.

Вторая группа классифицируется на виды (основные):

- барабанные;
- камерные;
- лотковые;
- пластинчатые;

Электрические сепараторы состоят из следующих основных блоков:

- бункер с питателем (иногда с подогревом);
- зарядное устройство, где производится зарядка частиц;
- сепарирующая часть, где с помощью электродов, рабочего органа образована рабочая зона;
- высоковольтный блок.

Зарядное устройство и сепарирующая часть конструктивно могут быть объединены или выполнены отдельно.

4.2 Сепараторы для разделения минералов по электропроводности

4.2.1 Барабанные сепараторы

Барабанные сепараторы получили самое широкое распространение.

На рис. 4.1 показана схема коронно-электростатического барабанного сепаратора, на основе которой можно представить конструкцию и принцип работы и коронного сепаратора.

Сепаратор состоит из вращающегося (с управляемой частотой) металлического заземленного барабана (осадительный электрод), остроконечного коронирующего электрода, цилиндрического отклоняющего электрода. На последние электроды (4 и 5) подается высокое, как правило, отрицательное напряжение. Вспомогательными частями сепаратора являются: бункер (1), питатель (2), очищающая щетка (6) и приемники продуктов (7).

Подготовленный для сепарации материал дозируется на поверхность вращающегося барабана, который переносит его в зону коронного разряда. Здесь все частицы получают заряд, обусловленный осаждением ионов воздуха из внешней

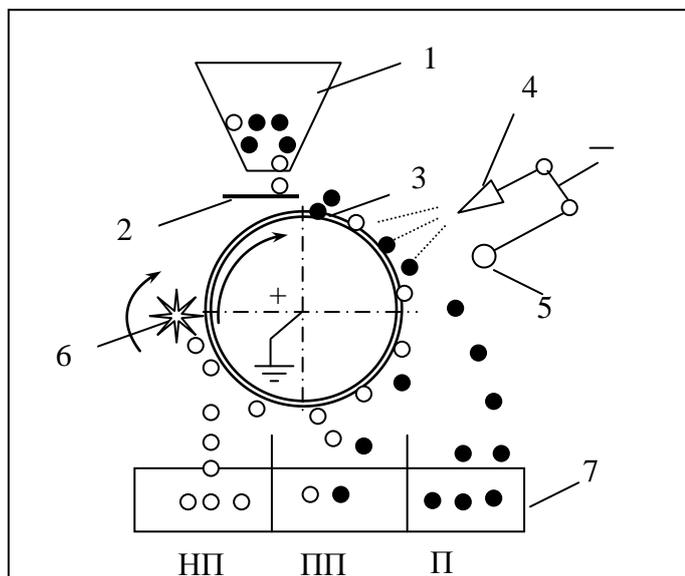


Рис. 4.1 Схема барабанного коронно-электростатического сепаратора
1 – бункер; 2 – питатель; 3, 4, 5 – осадительный, коронирующий и отклоняющий электроды; 6 – щетка; 7 – приемник продуктов

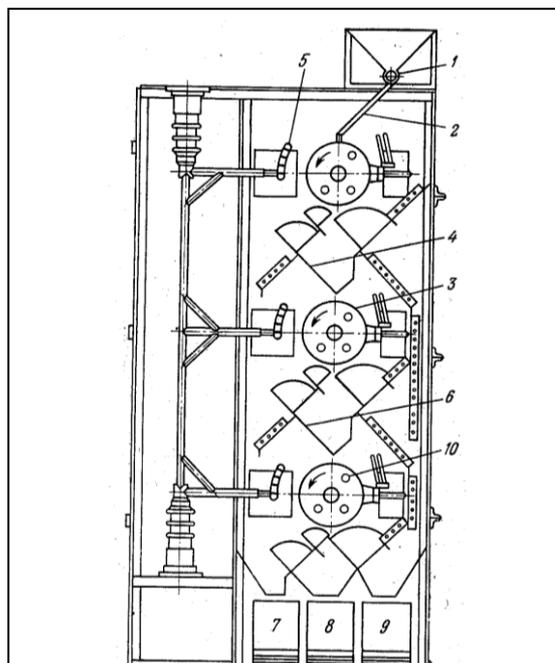


Рис. 4.2 Общий вид трехбарабанного коронирующего сепаратора

части короны. Поскольку кинетика разряда частиц, касающихся барабана, зависит от проводимости, траектории движения их будут различны.

Проводники, перезарядившись при контакте с барабаном, отталкиваются от него. Электрод (5), находясь под противоположным зарядом, усиливает отклонение траектории движения проводников, что повышает селективность разделения. Сбросу частиц с барабана способствует и центробежная сила.

Непроводники разряжаются очень медленно, адсорбированные на их поверхности отрицательные ионы прижимают частицы к барабану, который выносит их в зону разгрузки. Вращающаяся щетка (6) окончательно разгружает эту фракцию в приемник.

Полупроводники, имеющие промежуточные свойства, частично отдают свой

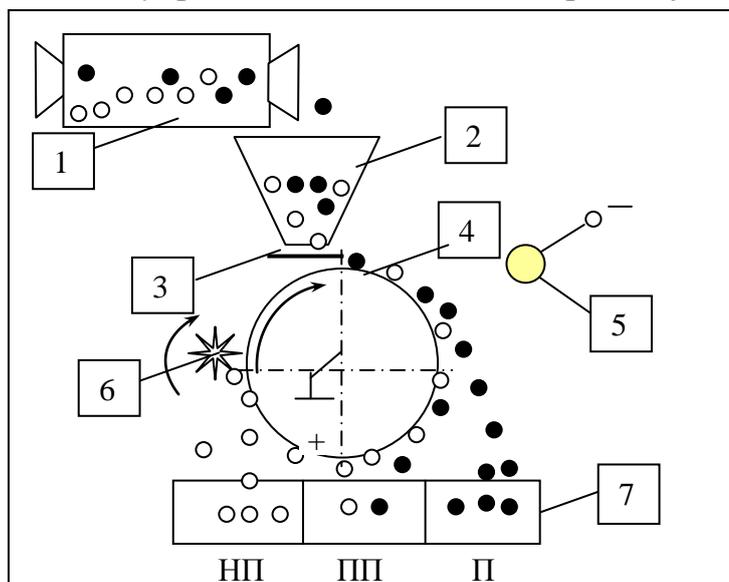


Рис. 4.3 Схема трибоэлектрического сепаратора

заряд осадительному электроду и разгружаются в нижней части барабана.

Если отключить отклоняющий электрод (5), сепаратор становится коронным. Работа его аналогична. Исключено только дополнительное влияние отклонение проводниковой фракции.

Работа электростатического барабанного сепаратора понятна из схемы, приведенной на рис. 2.4,а.

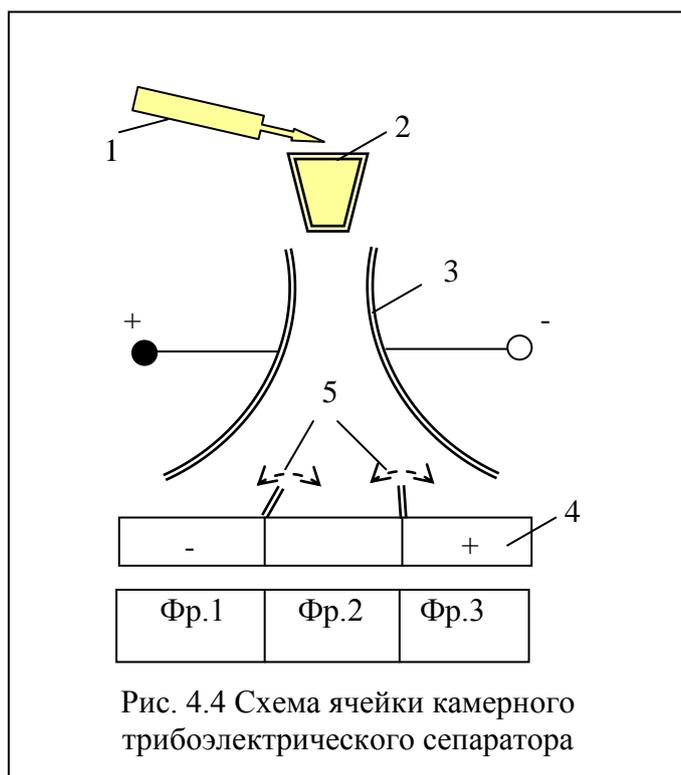
В промышленности используются многобарабанные сепараторы (рис. 4.2), например, ЭКС-1250, ЭКС-3000, СЭС-2000 и пр. В обо-

значении сепараторов число указывает рабочую длину барабана. Производительность их колеблется от 1.5 до 5 т/час.

На рис. 4.3 показана схема *трибоэлектрического* барабанного сепаратора, которая от схемы коронно-электростатического отличается отсутствием коронирующего электрода и наличием электризатора (1), выполненного в виде вращающегося барабана. Работа сепаратора будет понятна, если вспомнить раздел 2.3.2.

Вместо вращающегося барабана можно установить вибрационный лоток, где также происходит зарядка частиц методом электризации, но при этом снижается производительность сепаратора.

4.2.2 Камерные сепараторы



На рис. 4.4 показана схема реализации трибоэлектрической сепарации в ячейке камерного трибоэлектростатического сепаратора.

Он применяется для разделения частиц (тонкодисперсной крупности), относящихся, как правило, к одной группе по проводимости. Здесь в вибрационном лотке (1) и дозаторе (2) частицы получают заряд, согласно с их свойствами (этап зарядки частиц) и в соответствии с действующими кулоновскими силами либо притягиваются к электроду (3), либо него отталкиваются.

В результате в приемнике продуктов (4) аккумулируются фракции с соответствующими электропроводными свойствами.

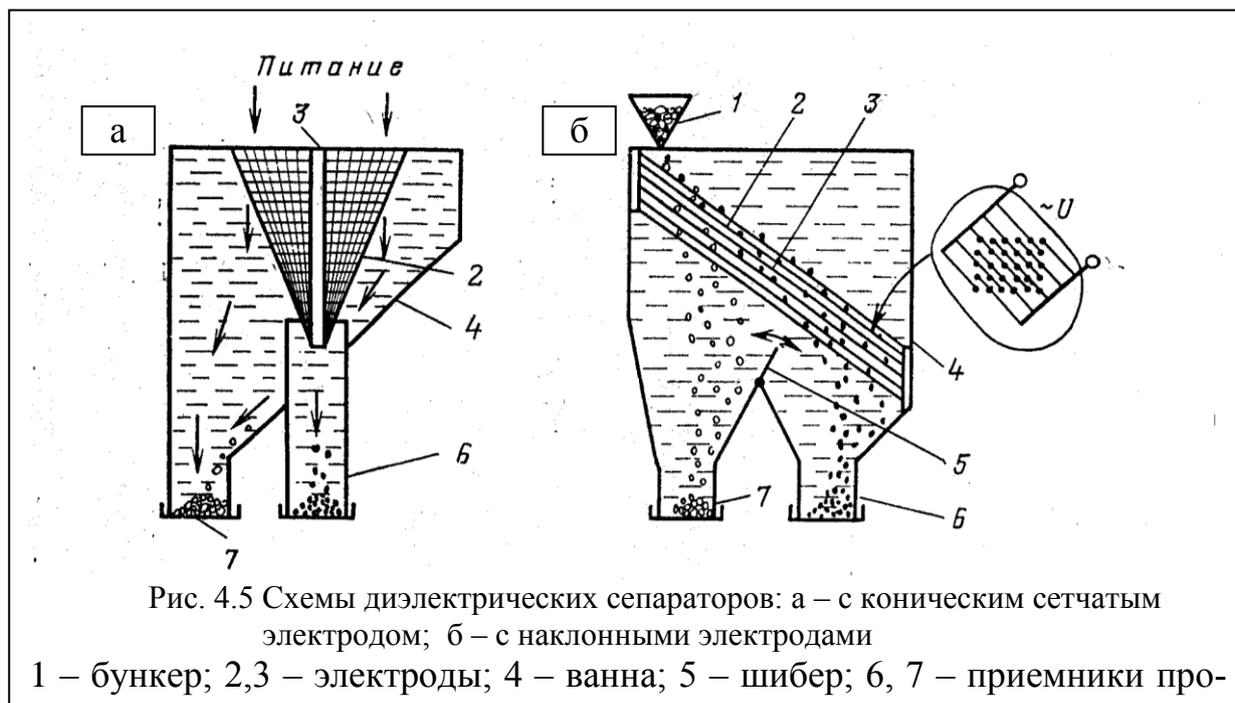
Поворотный шибер (5) служит для отсекаания веера раскрытия продуктов по фракциям.

4.2.3 Диэлектрические сепараторы

Принцип их действия основан на взаимодействии частиц, имеющих различные значения диэлектрической проницаемости (см. раздел 2.2.3).

На рис. 4.5 показаны схемы диэлектрических сепараторов.

Неоднородное электрическое поле здесь создается с помощью электродов (2) и (3). Частицы, имеющие большее значение диэлектрической проницаемости, чем проницаемость среды, будут втягиваться пондеромоторной силой в область повышенной напряженности поля собираться в приемниках (6). Минералы с диэлектрической проницаемостью меньшей, чем значение проницаемости среды выталкиваются в область пониженной напряженности поля и концентрируются в приемнике (7).



5 ПОДГОТОВКА РУДЫ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ

Подготовка руды к электрической сепарации может включать следующие операции:

- классификация (обеспыливание);
- термическая сушка;
- обработка поверхности реагентами;
- увлажнение;
- термическая обработка (нагрев).

Обеспыливание – отделение тонкодисперсных частиц (<40 мкм) при диэлектрической сепарации и разделении частиц по электропроводности. Указанный класс крупности нарушает селективность процесса. Применяется редко.

Термическая сушка – удаление поверхностной влаги. Операция снижает вероятность слипания частиц, увеличивает контрастность гидрофильных частиц (смачивающихся водой), отличающихся объемными электропроводностями.

Обработка поверхности реагентами – операции, направленные на изменение в нужном направлении поверхностной электропроводности и снижение сил адгезии. Может осуществляться по нескольким направлениям:

- усиление гидрофобности одного из минералов с помощью органических реагентов, за которым следует увлажнение всей массы исходного, последнее приводит к повышению контрастности в электропроводности гидрофобинизированных и гидрофильных частиц.
- изменение электрической проводимости путем создания на поверхности одного из минералов электропроводной пленки с помощью неорганических реагентов;

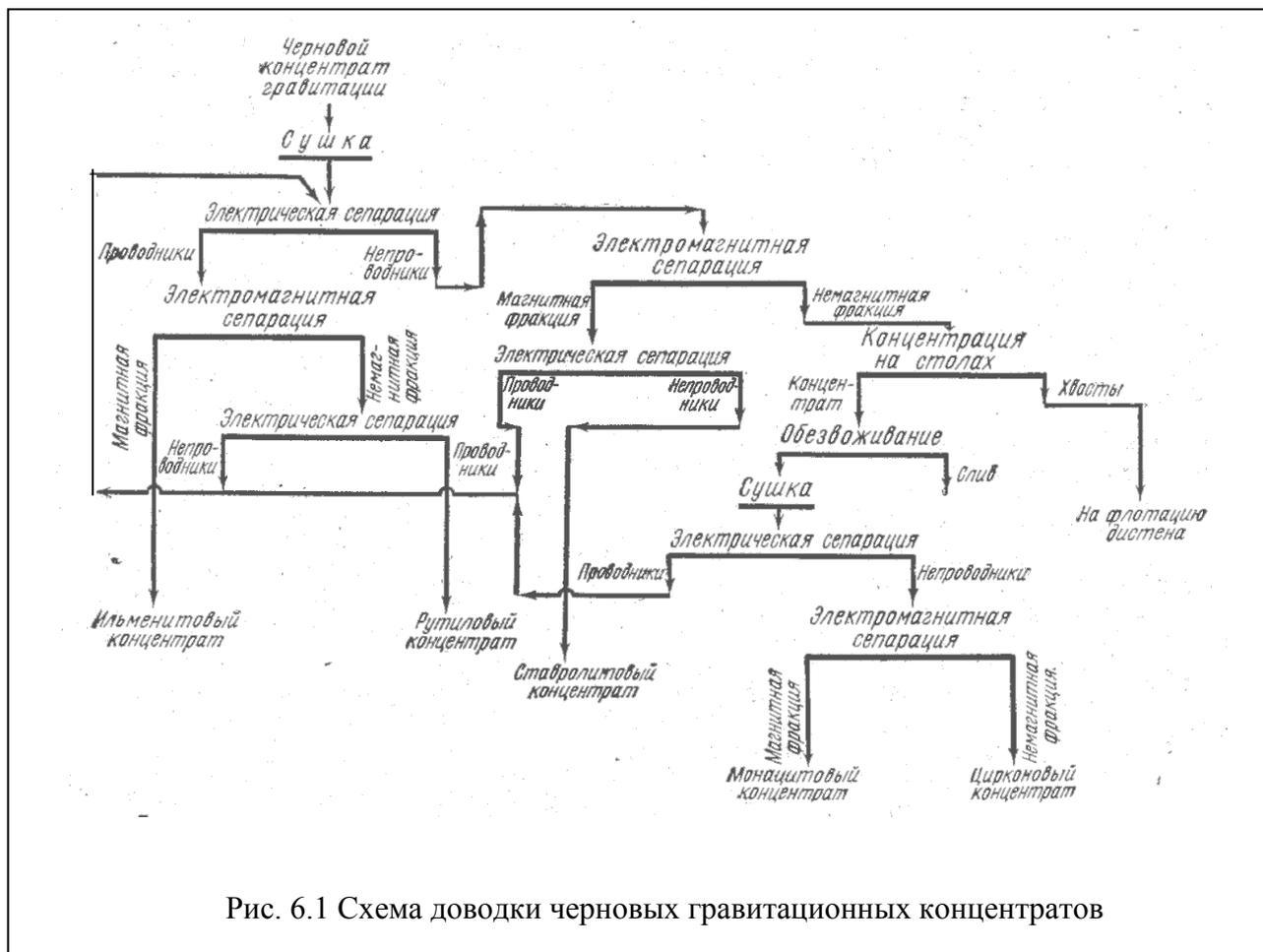
- снижение сил адгезии (слипания) между разделяемыми минералами.

Увлажнение – применяется в случае, если разделяемые минералы имеют близкие значения объемной электропроводности, а поверхность их характеризуется различной степенью гидрофобности. В этом случае гидрофильные частицы по свойствам приближаются к проводникам из-за увеличения поверхностной составляющей электропроводности. Увлажнение "мягкое", влажность до 5 %. Операция применяется, например, при выделении алмазов.

Термическая обработка (нагрев) – нагрев сепарируемого материала до 50 – 300° С усиливает контрастность электропроводности минералов П и ПП (НП) групп. С повышением температуры проводимость минералов групп ПП и НП растет, а минералов проводников – падает. Кроме того, при повышенных температурах усиливается эффект контактной электризации. Операция часто реализуется путем установки нагревателей в бункер исходного материала и в конструкцию питателя.

6 ПРАКТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОГАЩЕНИЯ

Самое широкое распространение электрическая сепарация получила в схемах доводки титано-циркониевых концентратов для отделения рутила, ильменита, лейкоксена от цирконов, моноцита, ставролита, турмалина, граната и кварца.



На рис. 6.1 показан фрагмент схемы доводки черновых концентратов электрической и магнитной сепарацией.

Приведенная технология позволяет получать концентраты:

- *ильменитовый*, содержащий 96 – 98 % ильменита ($60\% \text{TiO}_2$), до 2 % Cr_2O_3 ;
- *рутиловый*, содержащий до 94 % рутила и 5 % ильменита (до $95\% \text{TiO}_2$);
- *цирконовый*, содержит до 97 % циркона;
- *ставролитовый*, содержит до 90 % ставролита (до $47\% \text{Al}_2\text{O}_3$);
- *дистен-силлиманитовый*, содержащий до 93 % дистена и силлиманита ($58\% \text{Al}_2\text{O}_3$).

Извлечение двуокиси титана и циркона в соответствующие концентраты составляет 93 – 95 % от операции доводки коллективного концентрата.

Процесс обогащения осуществляется на сепараторах ЭКС-1250 и ЭКС-3000.

Электрическая сепарация применяется также для доводки *тантало-ниобиевых* гравитационных концентратов. В результате доводки получают высококачественный колумбитовый, танталовый, цирконовый и касситеритовый концентраты.

В отечественной практике электросепарацию применяют и для обогащения кварцевых песков. После отделения от кварца полевых шпатов, сланцев и других примесей получают кварцевый концентрат содержащий до $98\% \text{SiO}_2$.

В заключение следует отметить, что электрические методы обогащения могут применяться при разделении практически любых минералов. Например, отделение неорганической серы из угольных концентратов, обогащение железных и марганцевых руд и пр. Однако из-за малой производительности промышленных сепараторов применение данных методов в крупнотоннажном производстве не всегда экономически оправдано.

Литература

1. В.В. Кармазин, В.И. Кармазин. Магнитные и электрические методы обогащения: Уч. для вузов. – М.: - Недра, 1988. –304 с.
2. Справочник по обогащению руд. Гл. ред. Багданов О.С. Т. 2 "Основные и вспомогательные процессы", ч. 1 "Основные процессы". М.: - Недра, 1974. – 448 с.
3. Кравец Б.Н. Специальные и комбинированные методы обогащения. М.: - Недра. 1986. – 236 с.