

Министерство образования и науки
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Уральский государственный горный университет»



А. Е. Пелевин

МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ

Допущено Учебно-методическим объединением
вузов Российской Федерации по образованию в
области горного дела в качестве учебного
пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности «Обогащение
полезных ископаемых» направления подготовки
дипломированных специалистов «Горное дело»

Третье издание, исправленное

Екатеринбург - 2015

УДК 622.777/778 (075)

П 23

Рецензенты: Лаборатория обогащения руд чёрных металлов
ОАО «Уралмеханобр»;
В. А. Шалюгина, к.т.н., с.н.с. лаб. Обогащения
ОАО «НИИпроектасбест»

Печатается по решению Редакционно-издательского совета
Уральского государственного горного университета

Пелевин А. Е.

П 23 Магнитные и электрические методы обогащения:

Учебное пособие. 3-е издание, исправленное / А.Е. Пелевин; Урал.
гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. – 159 с.

В учебном пособии рассмотрены магнитные и электрические методы, являющиеся основными процессами обогащения полезных ископаемых и другого вида сырья.

Описаны физические основы магнитных и электрических методов обогащения и основные силы, посредством которых осуществляется разделение частиц в магнитных и электрических полях. Рассмотрены методики определения магнитных и электрических свойств минералов. Приведены конструкции магнитных и электрических сепараторов и принцип разделения исходного материала в них. Описаны области применения рассматриваемых методов обогащения.

Для студентов специализации «Обогащение полезных ископаемых» направления 130400 «Горное дело».

Рис. 28. Табл. 20. Библ. 15 назв.

© Уральская гос. горно-
геологическая академия,
2003, 2004.

© Уральская гос. горный
университет, 2015

© Пелевин А. Е., 2004.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
<i>Часть первая. Магнитные методы обогащения полезных</i>	
ископаемых	6
1. История развития и область применения магнитных методов	
обогащения.	6
2. Физические основы магнитного метода обогащения	7
2.1. Сущность и классификация магнитных методов обогащения	7
2.2. Магнитная сила и её составляющие	14
2.3. Магнитные поля сепараторов	16
2.4. Динамика движения частиц при магнитной сепарации	25
3. Магнитные свойства минералов	32
3.1. Классификация минералов по магнитным свойствам	35
3.2. Определение магнитных свойств минералов	36
3.3. Магнитные свойства магнетита	39
3.4. Магнитная восприимчивость различных минералов	41
3.5. Влияние магнитных свойств разделяемых частиц на	
процесс магнитного обогащения	43
4. Магнитные сепараторы	44
4.1. Классификация и обозначение магнитных сепараторов . . .	44
4.2. Сепараторы со слабым магнитным полем для сухого и	
мокрого обогащения сильномагнитных руд и	
железоотделители	49
4.3. Сепараторы с сильным магнитным полем для сухого и	
мокрого обогащения слабомагнитных руд	64
4.4. Вспомогательное оборудование	82
4.5. Производительность магнитных сепараторов	86
5. Практика магнитного обогащения	90
5.1. Подготовка руды перед магнитным обогащением	90
5.2. Обогащение сильномагнитных руд	94
5.3. Обогащение слабомагнитных руд	100
5.4. Обогащение неметаллических полезных ископаемых	106
5.5. Обогащение вторичных металлов	107

<i>Часть вторая. Электрические методы обогащения полезных ископаемых</i>	113
6. История развития и область применения электрических методов обогащения	113
7. Физические основы электрического метода обогащения	114
7.1. Сущность и классификация электрических методов Обогащения	114
7.2. Электрические силы, действующие на частицы при электрическом обогащении	117
7.3. Методы сообщения частицам электрических зарядов. . . .	119
7.4. Электрические свойства минералов и их измерение	125
8. Электрические методы обогащения и конструкции сепараторов	131
8.1. Электростатическая сепарация	131
8.2. Трибоэлектростатическая сепарация	135
8.3. Сепарация в поле коронного разряда	137
8.4. Трибоадгезионная сепарация	141
8.5. Пневмоэлектрическая сепарация	143
8.6. Диэлектрическая сепарация	144
9. Практика электрического обогащения	146
9.1. Подготовка материала к электрическому обогащению. . .	146
9.2. Промышленные электрические сепараторы	149
9.3. Электрическое обогащение минералов и продуктов	150
Заключение	156
Список использованной литературы	157

ВВЕДЕНИЕ

Магнитный метод обогащения – метод разделения минералов, основанный на различии в магнитных свойствах разделяемых частиц.

Магнитные методы являются основным процессом при обогащении железных руд. Кроме этого, магнитный метод применяется для обогащения различных руд и продуктов, которые необходимо разделить по магнитным свойствам. Полезным продуктом при разделении может быть как магнитный, так и немагнитный.

Магнитное обогащение осуществляется в магнитном поле, которое создают магнитные системы сепараторов. В России и за рубежом разработано большое количество конструкций магнитных сепараторов для обогащения различных руд и продуктов.

Электрический метод обогащения – метод разделения минералов, основанный на различии в электрических свойствах разделяемых частиц.

Электрические методы обогащения применяются реже магнитных, в основном для доводки концентратов руд редких и черных металлов и при обогащении неметаллических полезных ископаемых. Электрическая сепарация находит применение и при обогащении дробленых вторичных металлов. Как правило, электрические методы применяются в технологических схемах с другими методами обогащения (гравитационным и магнитным).

В настоящем учебном пособии рассмотрены вопросы теории и практики применения магнитных и электрических методов обогащения.

Часть первая. **МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ

Впервые явление магнетизма было обнаружено китайцами, которые еще до нашей эры использовали полярность магнита и создали компас. Известны первые попытки (XVII, XVIII вв.) применения ручных постоянных магнитов для удаления магнетита из оловянных и других редкометаллических концентратов. Однако начало промышленного применения магнитного метода относится к концу XIX в., когда в США – Боллом и Нортон - и в Швеции – Венстремом - были разработаны первые барабанные сепараторы с электромагнитной системой для сухого обогащения магнетитовых руд.

В начале XX в. магнитное обогащение магнетитовых руд получило относительно большое развитие в Швеции, что было связано с разработкой Грендалем в 1906 г. первого барабанного сепаратора для мокрой сепарации. Создание этого сепаратора, являющегося прототипом современных барабанных сепараторов, позволило успешно и экономично обогащать мелкие классы крупности магнетитовых руд.

В конце XIX в. для магнитного обогащения слабомагнитных руд Ветериллем (США) был разработан ленточный сепаратор с замкнутой электромагнитной системой и заостренными полюсами, в котором была достигнута повышенная магнитная сила. В дальнейшем для обогащения слабомагнитных руд в России и за рубежом были разработаны дисковые, валковые и роликовые сепараторы, а также высокоградиентные сепараторы [1].

В России первый барабанный магнитный сепаратор был разработан в 1911 г. инженером В. А. Петровым на Урале и применен для сухой сепарации магнетитовой руды. Однако конструирование и серийное изготовление отечественных магнитных сепараторов было начато только в 1932-1934 гг. В настоящее время в России выпускаются практически все типы магнитных сепараторов (для сухого и

мокрого обогащения, с сильным и слабым полем), железоотделителей и другого специального оборудования, применяемого при магнитном обогащении.

Магнитные методы обогащения применяются:

- для обогащения руд черных и других металлов (железные, марганцевые руды и минералы россыпных месторождений);
- удаления железистых примесей из стекольного, керамического, абразивного и др. сырья (обезжелезивание неметаллических полезных ископаемых);
- регенерации тяжелосредних суспензий (извлечение магнетита и ферросилиция);
- удаления случайных железных предметов из различных продуктов обогатительных фабрик (исходный продукт дробилок, готовые концентраты сухих технологий и др.);
- переработки техногенного сырья (шламы и хвосты обогатительных фабрик; шлаки металлургического производства; кабельный, радиоэлектронный и другой лом цветных и черных металлов; твердые бытовые отходы).

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТНОГО МЕТОДА ОБОГАЩЕНИЯ

2.1. Сущность и классификация магнитных методов обогащения

Магнитный метод обогащения основан на различии в магнитных свойствах подлежащих разделению компонентов исходного сырья. Магнитное обогащение осуществляется в магнитных сепараторах или железоотделителях, особенностью которых является наличие в их рабочей зоне разделения магнитного поля. При движении разделяемого продукта через магнитное поле сепаратора под воздействием магнитной силы частицы с различными магнитными свойствами движутся по отличным друг от друга траекториям, что позволяет магнитные и немагнитные частицы выделять в свои продукты.

Кроме магнитной силы на частицы материала, перемещаемые через рабочую зону сепаратора, оказывают воздействие механические силы, которые совместно с магнитной определяют режим разделения. Среди механических сил выделим следующие.

1. Сила тяжести $F_g = mg$.

2. Центробежная сила $F_{ц} = m v^2 / R$ (когда $R \gg d$) или $F_{ц} = m v^2 (R + 0,5d)^2 / R^3$ (когда $d/R > 0,05$), возникающая при движении материала по криволинейной траектории (транспортирующая поверхность, барабан).

3. Сила адгезии или молекулярного сцепления (прилипания немагнитной частицы к магнитной или к барабану сепаратора) $F_{цл} = 4A\pi\sigma r_1 r_2 / (r_1 + r_2)$ или $F_{цл} = A\pi d\sigma$ (при одинаковом размере соприкасающихся частиц).

4. Сила сопротивления среды, в зависимости от крупности частиц, определяемая по законам Стокса, Аллена, Риттингера.

В приведенных формулах: m - масса частицы, кг; g - ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$; v - скорость вращения барабана сепаратора или движения частицы по криволинейной поверхности, м/с; R - радиус барабана или криволинейной поверхности, м; d - диаметр частицы, м; r_1 и r_2 - радиусы частиц, м; A - коэффициент, учитывающий площадь соприкосновения частиц, их влажность и др.; σ - поверхностное натяжение частиц на границе их раздела с окружающей средой (воздухом), Н/м.

Сила тяжести и магнитная сила действуют в одном направлении на разделяемые частицы в сепараторах с верхней подачей продукта. В аппаратах с движением материала под магнитной системой (нижняя подача) извлечение частиц в магнитную фракцию будет при условии, что магнитная сила F_m больше силы тяжести F_g . Центробежная сила стремится оторвать частицу от барабана сепаратора с верхней подачей и также конкурирует с магнитной. Силы адгезии имеют большое значение при сепарации мелкодробленых продуктов. Немагнитные пылевидные частицы прилипают к магнитным и к транспортирующей поверхности, попадая с ними в магнитный продукт, значительно ухудшают качество концентрата. Для борьбы с этим явлением сепарацию мелкодробленых продуктов осуществляют в центробежном режиме (повышенные скорости вра-

щения барабанов сепараторов), дополнительно применяя аспирационные системы для удаления пылевидных частиц. Сила сопротивления среды значимо не влияет на процесс разделения при сухом способе обогащения, так как плотность воздуха ($1,23 \text{ кг/м}^3$) значительно меньше плотности разделяемых материалов, хотя с уменьшением крупности частиц ее влияние на процесс возрастает. В большей степени сила сопротивления среды проявляется при обогащении в водной среде (мокрая сепарация).

Для разделения магнитных и немагнитных частиц в магнитном поле сепаратора магнитная сила F_m , действующая на магнитные частицы, должна превышать равнодействующую всех механических сил $\Sigma F_{\text{мех}}$, направленную противоположно F_m , а магнитная сила F_m , действующая на немагнитные частицы, должна быть меньше $\Sigma F_{\text{мех}}$. Для анализа процесса разделения магнитных и немагнитных частиц в магнитном поле необходимо уметь определять магнитную и механические силы, действующие на частицы различной крупности и с разными физическими свойствами.

Среди многообразия процессов магнитной сепарации можно выделить шесть основных способов магнитного разделения. Первые три способа относятся к чисто магнитному обогащению, когда разделение осуществляется под действием магнитной силы по магнитным свойствам. При четвертом способе разделение осуществляется по магнитным свойствам, но без создания магнитной силы. При пятом и шестом способах магнитная сила создает условия для разделения частиц по другим физическим свойствам (плотности, электрической проводимости). Рассмотрим способы магнитной сепарации.

1. Сепарация путем удерживания магнитных частиц на транспортирующей поверхности (барабане, валке и др.). Данный способ реализуется в сепараторах (барабанных, валковых, роликовых и др.) с верхней подачей исходного материала. Широкое распространение получила предварительная сухая магнитная сепарация крупнокусковых железных руд с целью удаления пустой породы (барабанные сепараторы). Роликовые и валковые сепараторы применяются реже (для обогащения слабомagnetных руд).

Способ осуществляется следующим образом (рис. 2.1, а). Исходные частицы попадают на барабан 1 и транспортируются им в

зону разделения, ограниченную областью действия (сектором) магнитной системы 2. Немагнитные частицы под действием механических сил отрываются от барабана раньше, чем магнитные, и попадают в свой приемник. Магнитные частицы притягиваются к магнитной системе и транспортируются барабаном до края магнитной системы, после чего они отрываются и попадают в свой приемник.

2. Сепарация путем извлечения или отклонения магнитных частиц из движущегося потока материала. Данный способ реализуется в сепараторах (барабанных, валковых, роликовых и др.) с нижней (реже боковой) подачей исходного материала. Наибольшее распространение получила мокрая магнитная сепарация измельченных железных руд (барабанные сепараторы). Роликовые и валковые сепараторы применяются реже (для обогащения слабомагнитных руд).

Способ осуществляется следующим образом (рис. 2.1, б). Исходные частицы транспортируются в зону разделения, ограниченную областью действия (сектором) магнитной системы 2. Немагнитные частицы движутся под барабаном 1, не изменяя траекторию под действием магнитной силы, и попадают в свой приемник. Магнитные частицы извлекаются из исходного потока материала, притягиваются к магнитной системе и транспортируются барабаном до края магнитной системы, после чего они отрываются и попадают в свой приемник

3. Сепарация путем магнитного осаждения частиц на поверхность носителей (ферромагнитных тел). Данный способ реализуется в высокоградиентных сепараторах. Наибольшее распространение получила мокрая высокоградиентная магнитная сепарация тонкоизмельченных слабомагнитных материалов.

Способ осуществляется следующим образом (рис. 2.1, в). При нахождении рабочей матрицы сепаратора 2 между полюсами магнитной системы 1 в нее подается исходный продукт. Пульпа исходного материала проходит сквозь слой намагниченных под действием внешнего магнитного поля ферромагнитных тел 3. Слабомагнитные частицы притягиваются к ферромагнитным телам, например шарам, а остальные частицы (немагнитные) удаляются потоком воды. После удаления немагнитных частиц рабочая матрица сепарато-

ра выводится из зоны действия внешнего магнитного поля и осуществляется удаление слабомагнитных частиц потоком воды.

4. Магнитометрическая сортировка зернистых материалов. Данный способ реализуется в радиометрических (магнитометрических) сепараторах, чаще в режиме покусковой сортировки для предварительного обогащения. Магнитометрическая сортировка не получила широкого распространения.

Способ осуществляется следующим образом (рис. 2.1, з). Частицы исходного продукта транспортируются конвейером 1 и проходят под электромагнитным индукционным датчиком 2, срабатывающим от собственного или наведенного магнитного поля частиц. Сигнал от датчика поступает в блок обработки информации и принятия решения 3, который определяет «качество» частицы и дает команду исполнительному механизму 4 на направление этой частицы в соответствующий приемник.

5. Магнитогидростатическая (феррогидростатическая) сепарация. Данный способ реализуется в феррогидростатических сепараторах для разделения немагнитных минералов и металлов.

Признаком разделения при магнитогидростатическом (МГС) обогащении, как и при тяжелосредном обогащении, является плотность. Особенностью магнитогидростатического разделения является то, что требуемая кажущаяся плотность ферромагнитной жидкости (до 12000 кг/м^3 и более) достигается под воздействием внешнего магнитного поля, что накладывает определённые ограничения на процесс, в частности на рабочий объем зоны разделения, который обуславливает производительность сепаратора.

Кроме магнитогидростатического метода известен магнитогидродинамический метод обогащения по плотности. Разделение осуществляется в потоке электролита. В конструкции МГД-сепаратора обеспечивается перекрестное действие магнитного и электрического полей, в результате чего кажущаяся плотность электролита возрастает. Тяжелые частицы опускаются на дно, легкие – всплывают на поверхность. Данные аппараты в настоящее время не получили промышленного применения.

Магнитогидростатический метод осуществляется следующим образом (рис. 2.1, д). Частицы разделяемого продукта подаются в

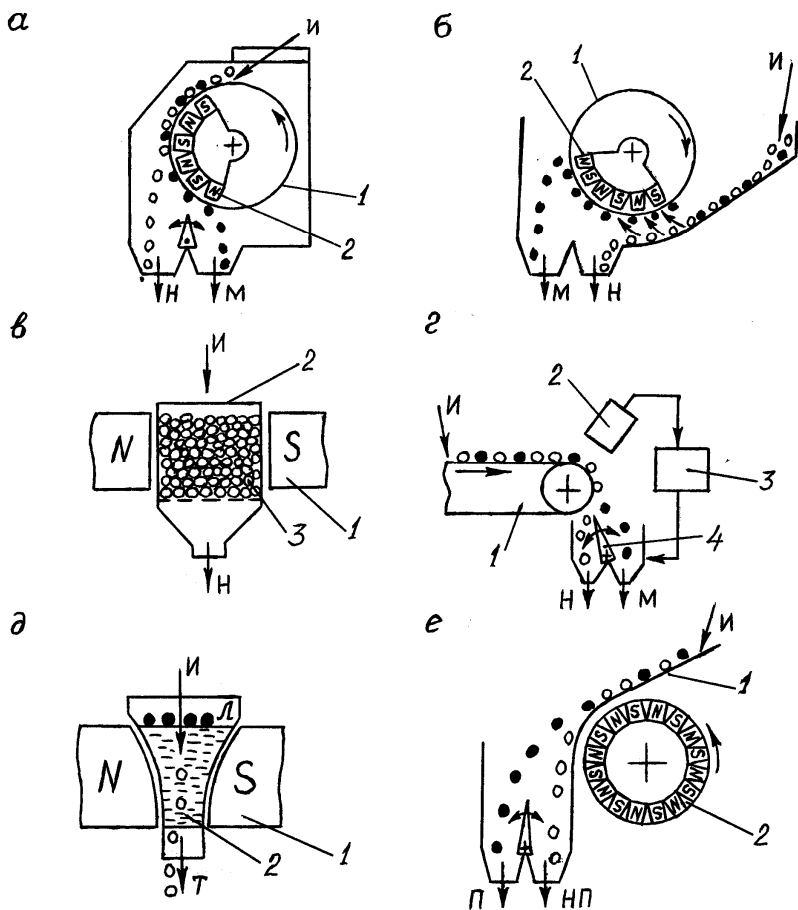


Рис. 2.1. Способы магнитного обогащения:

a – сепарация путем удерживания магнитных частиц; 1 – вращающийся барабан; 2 – неподвижная магнитная система; *б* – сепарация путем извлечения магнитных частиц; 1 – вращающийся барабан; 2 – неподвижная магнитная система; *в* – сепарация путем осаждения магнитных частиц на поверхности носителей; 1 – полюса магнитной системы; 2 – рабочая матрица; 3 – ферромагнитные тела; *г* – магнитометрическая сортировка: 1 – конвейер; 2 – датчик; 3 – блок обработки информации и принятия решения; 4 – исполнительный механизм; *д* – магнитогидростатическая сепарация: 1 – полюса магнитной системы; 2 – кювета, заполненная ферромагнитной жидкостью; *е* – электродинамическая сепарация: 1 – устройство для транспортировки материала в зону разделения; 2 – индуктор переменного магнитного поля.
и – исходный; м – магнитный; н – немагнитный; л – легкий; т – тяжелый; п – проводники; нп – непроводники

рабочую кювету 2 сепаратора, заполненную ферромагнитной жидкостью (ФМЖ) и находящуюся между полюсами магнитной системы 1. Обычно физическая плотностьготавливаемых ФМЖ не превышает 1300 кг/м^3 . Под действием магнитного поля плотность ФМЖ «возрастает» до 12000 кг/м^3 и более. Частицы разделяемого материала, имеющие плотность выше плотности магнитной жидкости, опускаются на дно ванны сепаратора, а частицы, имеющие более низкую плотность, поднимаются на поверхность жидкости.

6. Электродинамическая сепарация. Данный способ реализуется в электродинамических сепараторах для разделения немагнитных металлов по электропроводности (Cu-Pb, Al-Pb) или металлов от неметаллов.

Электродинамический метод обогащения основан на взаимодействии магнитного поля и вихревых токов, возникающих в электропроводном веществе под воздействием э.д.с., индуцируемой магнитным полем. Разделение происходит в переменном магнитном поле, причем это магнитное поле сначала создает в проводнике вихревой ток (электромагнитная индукция), а затем с ним взаимодействует - выталкивает с определенной силой. Переменное магнитное поле создается в сепараторах тремя способами: 1 - применением магнитных систем, питаемых переменным током; 2 - при движении частиц относительно магнитной системы с чередующейся полярностью полюсов; 3 - при вращении магнитной системы с чередующейся полярностью полюсов.

Электродинамический метод осуществляется следующим образом (рис. 2.1, е). Частицы разделяемого продукта подаются на наклонную криволинейную поверхность 1. Под действием вибраций или тангенциальной составляющей силы тяжести материал поступает в зону разделения, находящуюся над вращающимся индуктором бегущего магнитного поля (барабан, ролик) 2. Электропроводные частицы, взаимодействуя с магнитным полем, приобретают определенное ускорение, отклоняются от общего потока материала и попадают в свой приемник. Неэлектропроводные частицы свободно движутся по транспортирующей поверхности и попадают в свой приемник.

2.2. Магнитная сила и её составляющие

Магнитные поля бывают однородные и неоднородные. Для первых напряженность магнитного поля одинакова по величине и направлению ($\text{grad}H=0$), для вторых – напряженность отличается для разных точек рабочей зоны ($\text{grad}H>0$). В однородном магнитном поле магнитные частицы ориентируются параллельно силовым линиям поля. В неоднородном поле магнитные частицы, кроме ориентации вдоль силовых линий поля, испытывают воздействие магнитной силы притяжения, которая втягивает частицы в более интенсивные участки поля. В магнитных сепараторах применяют только неоднородные поля для создания магнитной силы, обеспечивающей разделение частиц на магнитные и немагнитные.

Магнитная сила, действующая на частицу, определяется потенциальной энергией, приобретаемой частицей во время намагничивания:

$$U = - \int_V \frac{\mu_0 \alpha H^2}{2} dV, \quad (2.1)$$

где μ_0 - магнитная проницаемость вакуума или магнитная постоянная, Гн/м; $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$; α - объёмная магнитная восприимчивость частицы, безразмерная величина; H - напряжённость магнитного поля, А/м; V - объём частицы, м³.

Как известно из механики, сила, действующая на тело, может быть выражена через $\text{grad}U$ с обратным знаком, тогда

$$F_m = -\text{grad}U = \text{grad} \int_V \frac{\mu_0 \alpha H^2}{2} dV, \quad (2.2)$$

Включая знак grad в подинтегральное выражение и допуская, что в пределах объёма частицы магнитная восприимчивость постоянна, получим:

$$F_m = \mu_0 \alpha \int_V H \text{grad}H dV, \quad (2.3)$$

где $\text{grad}H$ – производная dH/dx в направлении наибольшего возрастания H , А/м².

При незначительном объеме частицы ($V \rightarrow 0$) можно допустить, что в пределах её объема изменение $H \text{grad} H$ незначительно, тогда

$$F_m = \mu_0 \alpha V H \text{grad} H. \quad (2.4)$$

Удельное значение магнитной силы, отнесенной к единице массы,

$$f_m = F_m / m = \mu_0 \alpha V H \text{grad} H / (V \rho) = \mu_0 \chi H \text{grad} H, \quad (2.5)$$

где χ - удельная магнитная восприимчивость, равная α / ρ , $\text{м}^3 / \text{кг}$; ρ - плотность частицы, $\text{кг} / \text{м}^3$.

Преобразуем формулу (2.3), приняв объем частицы в виде куба, что позволяет заменить V на высоту частицы d . Заменим α на $\chi \cdot \rho$, найдём удельную магнитную силу:

$$f_m = F_m / (V \rho) = \mu_0 \chi \rho / (V \rho) \cdot \int_V H \text{grad} H dV = \mu_0 \chi / d \cdot \int_d H \text{grad} H dd. \quad (2.6)$$

В работе [1] отмечено, что при нахождении частицы магнетита над полюсами магнитной системы формула (2.5) даёт несколько заниженный результат. Это подтвердили опыты по проверке магнитной силы на экспериментальной установке. Поэтому при теоретических вычислениях магнитной силы, действующей на конкретный кусок руды, в расчетные формулы необходимо добавлять поправочный коэффициент a , например, $f_m = a \mu_0 \chi H \text{grad} H$. Предложены следующие значения коэффициента: $a=1,1$ - для максимальной крупности продукта 5 мм; $a=1,5$ - для максимальной крупности продукта от 5 до 25 мм; $a=2$ - для максимальной крупности продукта более 25 мм. Однако совершенно очевидно, что коэффициент a будет зависеть от содержания сильномагнитных частиц в исходном продукте, а также от конструкции магнитной системы конкретного сепаратора.

Анализ формул для расчета магнитной силы притяжения показывает, что на неё влияют две составляющие. *Первая* характеризует конструкцию магнитной системы - $H \text{grad} H$. Величину $H \text{grad} H$ принято называть *удельной магнитной силой магнитной системы*. Она зависит от напряженности магнитного поля на поверхности полюсов, от расстояния между полюсами, размеров рабочей зоны сепаратора и других параметров. *Вторая* составляющая характеризует свойства разделяемых частиц - магнитные (α , χ) и геометрические (крупность, форма).

Для разделения частиц на магнитные и немагнитные необходимо создать определенное значение магнитной силы, превышающей противодействующие силы. При обогащении сильномагнитных руд с высокими магнитными свойствами (α , χ) необходимы сепараторы с относительно низким значением $H_{\text{grad}H}$, а при обогащении слабомагнитных руд с низкими магнитными свойствами необходимы сепараторы с относительно высоким значением $H_{\text{grad}H}$.

2.3. Магнитные поля сепараторов

Аппараты для обогащения сильномагнитных руд получили название *сепараторы со слабым магнитным полем*, а аппараты для обогащения слабомагнитных руд - *сепараторы с сильным магнитным полем*.

В сепараторах для обогащения сильномагнитных руд применяются обычно *открытые магнитные системы* (рис. 2.2, а), а в сепараторах для слабомагнитных руд – *замкнутые магнитные системы* (рис. 2.2, б). Первые характеризуются расположением рабочей зоны разделения с одной стороны от полюсов, вторые - расположением рабочей зоны между полюсами.

Рабочей зоной сепаратора называется участок магнитной системы над или между полюсами, где происходит разделение частиц на магнитные и немагнитные, сопровождающееся притяжением магнитных частиц к полюсам, удерживанием их и транспортированием к месту разгрузки.

Длина L рабочей зоны сепараторов (см. рис. 2.2) определяется расстоянием от начала участка, где начинается притяжение магнитных частиц, до участка, где кончается разгрузка немагнитных частиц. Высота рабочей зоны l сепараторов выбирается исходя из крупности обогащаемого материала и его магнитных свойств.

Сепараторы для обогащения слабомагнитных руд с замкнутыми магнитными системами имеют обычно рабочую зону малой длины и высоты, что объясняется трудностью создания сильного поля в большом объеме. Последнее ограничивает крупность обогащаемых частиц (обычно менее 5 мм). Сепараторы с открытыми магнитными

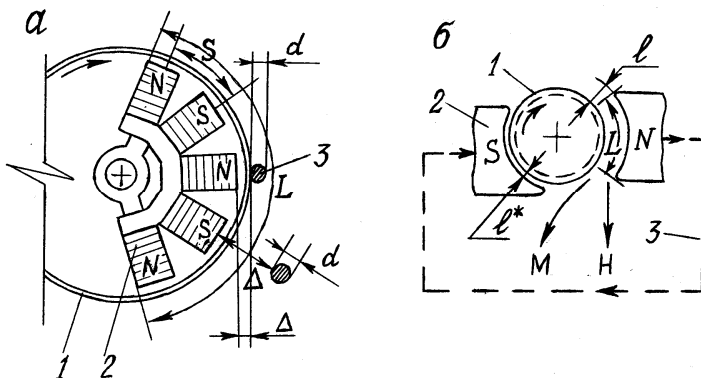


Рис. 2.2. Схемы магнитных систем сепараторов:

a – сепаратор с открытой многополюсной системой: 1 – барабан; 2 – полюса; 3 – частица руды; Δ – расстояние от поверхности полюса до частицы; S – шаг полюсов; d – размер частицы; *б* – сепаратор с замкнутой магнитной системой: 1 – валок; 2 – полюса; 3 – схематичное изображение магнитпровода. L – длина рабочей зоны; l – высота рабочей зоны; $l^* \rightarrow 0$

системами имеют обычно более высокую длину и высоту рабочей зоны, что не накладывает принципиальных ограничений на крупность разделяемого материала, которая достигает 100 мм.

Магнитное поле сепараторов для сильномагнитных руд с открытыми многополюсными системами

Сепараторы с открытыми магнитными системами имеют ряд полюсов чередующейся полярности, края которых расположены по цилиндрической поверхности (см. рис. 2.2, а) или в плоскости.

На характеристику поля многополюсных магнитных систем влияет напряженность магнитного поля на поверхности полюсов, шаг полюсов S , отношение ширины полюса b к ширине паза между полюсами a и форма полюсов или полюсных наконечников. *Шагом полюсов* многополюсной магнитной системы называется расстояние между центрами двух соседних разноименных полюсов.

Изменение напряженности магнитного поля по нормали к поверхности полюсов определяется равенством

$$H_x = H_0 e^{-cx}, \quad (2.7)$$

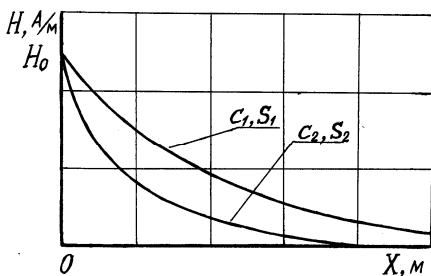


Рис. 2.3. Изменение напряжённости магнитного поля при удалении от поверхности полюсов:
 $c_1 < c_2$; $S_1 > S_2$

где H_x – напряженность на расстоянии x от полюса, А/м; H_0 – напряженность на поверхности полюса ($x=0$), А/м; c – коэффициент неоднородности магнитного поля, m^{-1} .

При расположении полюсов по цилиндрической поверхности (барабан) коэффициент неоднородности поля

$$c = \pi/S + 1/R, \quad (2.8)$$

где R – радиус цилиндрической поверхности, м.

При расположении полюсов в плоскости ($R \rightarrow \infty$) коэффициент неоднородности поля

$$c = \pi/S. \quad (2.9)$$

На рис. 2.3 приведены зависимости изменения напряженности магнитного поля при удалении от поверхности полюсов для различных значений шага полюсов. При малом шаге полюсов (S_2) и высоком коэффициенте неоднородности магнитного поля (c_2) напряженность магнитного поля падает резче по сравнению с системой, характеризующейся более большим шагом полюсов (S_1) и низким коэффициентом неоднородности магнитного поля (c_1). Из данных зависимостей видно, что при низкой крупности исходного продукта и при движении частиц руды вблизи полюсов можно использовать магнитную систему с малым шагом полюсов (меньше масса), чем при обогащении более крупного материала или при движении частиц на расстоянии от магнитной системы (нижняя подача).

Оптимальный полюсный шаг определяется крупностью обогащаемого продукта и расстоянием от частиц руды до магнитной системы (нижняя или верхняя подача).

Найдём удельную магнитную силу для частицы размером d , находящейся на расстоянии Δ от поверхности полюса (см. рис. 2.2). Величина $\text{grad}H$ согласно (2.6) будет равна cH_0e^{-cx} . Тогда

$$H_{\text{grad}}H = cH_0^2 e^{-2cx}. \quad (2.10)$$

Получим формулу для удельной магнитной силы, действующей на частицу кубической формы, находящейся на расстоянии Δ от поверхности полюса. Для этого подставим в формулу (2.6) поправочный коэффициент a и величину $H_{\text{grad}}H$ из формулы (2.10):

$$f_m = \frac{a\mu_0\chi}{d} \int_d cH_0^2 e^{-2cx} dd = \frac{a\mu_0\chi H_0^2 c}{2cd} e^{-2cx} \Big|_{\Delta+d}^{\Delta}.$$

Подставляя пределы интегрирования, получаем конечную формулу

$$f_m = \frac{a\mu_0\chi H_0^2}{2d} e^{-2c\Delta} (1 - e^{-2cd}). \quad (2.11)$$

Анализ формулы (2.11) показывает, что при увеличении Δ и d магнитная сила снижается по экспоненциальному закону, тем быстрее, чем больше коэффициент c или меньше шаг полюсов S . При $\Delta \rightarrow 0$ (частица лежит на полюсе) $f_m = a\mu_0\chi H_0^2 (1 - e^{-2cd})/2d$, при $\Delta \rightarrow 0$ и при $d \rightarrow 0$ — $f_m = a\mu_0\chi H_0^2 c$.

Для нахождения оптимального шага полюсов необходимо взять производную удельной магнитной силы притяжения по c , приравнять её к 0 (исследовав на экстремум):

$$\begin{aligned} df_m/dc &= -2\Delta e^{-2c\Delta} + 2(\Delta+d)e^{-2c(\Delta+d)} = 0; \\ \ln[(\Delta+d)/\Delta] &= 2cd. \end{aligned}$$

Подставляя в полученное выражение вместо c зависимости (2.8) и (2.9), получим:

$$S = \frac{2\pi d}{\ln(1+d/\Delta)} \quad \text{или} \quad S = \frac{2\pi dR}{R \ln(1+d/\Delta) - 2d}. \quad (2.12)$$

Первая зависимость справедлива для подвесных аппаратов с плоской магнитной системой, вторая — для барабанных сепараторов. Сепаратор для обогащения того или иного материала необходимо выбирать таким образом, чтобы шаг полюсов магнитной системы соответствовал равенствам (2.12) для достижения максимальной магнитной силы.

Расстояние Δ определяется толщиной ленты или барабана и минимально возможным зазором между поверхностью полюса и барабаном, когда разделение протекает на сепараторе с верхней подачей. В аппаратах с нижней подачей, например, подвесных железоотделителях, к величине Δ добавляется еще и расстояние от верхней границы частицы до транспортирующей поверхности. У подвесных железоотделителей, устанавливаемых над транспортерными лентами, для увеличения глубины магнитного поля шаг полюсов составляет 0,5-0,6 м, что больше шага полюсов шкивных железоотделителей, равного 0,3-0,4 м.

При обогащении мелкого материала, при низких d и Δ , шаг полюсов можно уменьшить для сепараторов с верхней подачей материала. Например, при $\Delta=0,003$ и $0,007$ м для $d=0,001$ м оптимальный шаг полюсов равен 0,023 и 0,0528 м, а для $d=0,01$ м - $S_{\text{опт}}=0,048$ и 0,085 м соответственно.

На характеристику поля открытых магнитных систем, кроме шага полюсов, оказывает влияние ширина полюса (b), зазор между полюсами (a) и конфигурация полюса. Обычно отношение $b:a$ принимают равным 1,2:1 для систем из литых никель-кобальтовых магнитов, обладающих большой остаточной индукцией и относительно малой коэрцитивной силой. У систем из анизотропного феррита бария, обладающего большой коэрцитивной силой и малой остаточной индукцией, $b:a$ изменяется от 3:1 до 5:1. Оптимальное соотношение $b:a$ обеспечивает более равномерное магнитное поле вдоль чередующихся полюсов магнитной системы (без резкого увеличения или уменьшения над зазорами между полюсами). Края полюсных окончаний обычно закругляют по дуге радиусом $0,4S-0,6S$.

Одной из важнейших характеристик, определяющих магнитную силу, является напряженность магнитного поля на поверхности полюсов, которая определяется видом материала для изготовления постоянных магнитов, или - для электромагнитных систем - конструкцией системы. Напряженность поля магнитных сепараторов с системами из феррита бария обычно не превышает 120 кА/м. В последнее время для создания более мощных магнитных систем используют магниты из самарий-кобальта, неодим-железобора и др., например SmCo_5 , $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, SmTiFe_{11} . Эти магниты достаточно

дорогие, поэтому их применяют для изготовления небольших сепараторов с малым шагом полюсов для обогащения мелкодробленных продуктов.

Для увеличения магнитной силы между основными полюсами устанавливают дополнительные контрмагниты (магнитные клинья) из материалов с повышенной энергией для выталкивания магнитного поля в рабочую зону. При этом смежные стороны основного и дополнительного полюсов однополярны. Это повышает напряженность магнитного поля и магнитную силу на поверхности барабана и в рабочей зоне. Кроме того, использование корректирующих магнитов позволяет получить более равномерную картину магнитного поля на поверхности барабана (над полюсами и в межполюсных зазорах).

Таким образом, на магнитную силу притяжения открытой многополюсной системы влияют следующие параметры: напряженность магнитного поля на поверхности полюса H_0 , полюсный шаг S , расстояние от поверхности полюса до границы частицы Δ . Среди характеристик разделяемого сырья на величину магнитной силы влияют размер (высота) частицы d и удельная магнитная восприимчивость χ , которая во многом определяет возможность магнитного обогащения.

Магнитное поле сепараторов для слабомагнитных руд с замкнутыми магнитными системами

Магнитная сила сепараторов с замкнутыми магнитными системами (см. рис. 2.2, б) характеризуется высотой l (рабочим зазором или расстоянием между полюсами) и длиной L рабочей зоны, формой полюсов рабочего элемента (валка, ролика, диска и др.). Магнитное поле сепараторов с замкнутыми системами характеризуется большой неоднородностью поля, позволяющей достигать высокие значения магнитной силы. Неоднородность поля достигается применением полюсов с малым радиусом кривизны.

Наибольшее распространение в сепараторах получило применение сочетания одно- и многозубчатого полюса с зубцами прямоугольного и треугольного сечений (вращающийся валок, ролик и др.) и противопоставленного ему неподвижного плоского полюса или полюса с выемками (рис. 2.4).

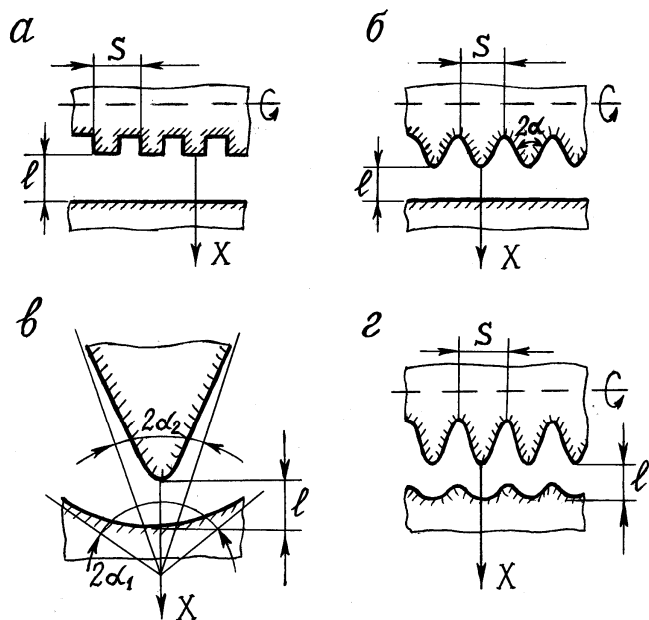


Рис. 2.4. Форма полюсов, применяемых в замкнутых магнитных системах сепараторов для слабомагнитных руд:

a – сочетание многозубчатого полюса с зубцами прямоугольного сечения и плоского; *б* – сочетание многозубчатого полюса с зубцами треугольного сечения и плоского; *в* – сочетание выпуклого и вогнутого гиперболических полюсов; *г* – сочетание многозубчатого полюса с зубцами треугольного сечения и полюса с выемками.

S – шаг зубцов; l – расстояние между полюсами; α – угол заострения зубца; α_1 и α_2 – половины углов между асимптотами вогнутого и выпуклого гиперболических полюсов

Треугольное сечение зубцов вала сепаратора позволяет получить более высокое значение магнитной силы ($H \text{grad} H$) по сравнению с прямоугольной формой сечения зубцов. Прямоугольное сечение зубцов вала применяют, когда это необходимо по конструктивным соображениям, например, в сепараторах с верхним питанием для обеспечения гладкой поверхности вала. Последнее достигается чередованием на валу железных и немагнитных колец с прямоугольным сечением, что соответствует прямоугольному сечению зубцов.

Использование неподвижного полюса с выемками напротив многозубчатого полюса приводит к повышению неоднородности магнитного поля и величины H_{gradH} по сравнению с плоским неподвижным полюсом.

При треугольном сечении зубцов на величину H_{gradH} оказывают влияние угол заострения зубцов 2α и радиус закругления края зубцов. Угол заострения зубцов обычно принимают равным $45-50^\circ$, а радиус закругления края зубцов – $0,1S$ (см. рис.2.4).

Шаг зубцов S и расстояние l между полюсами оказывают существенное влияние на магнитную силу. При $l \leq 0,5S$ магнитное поле будет неоднородно и будет достигнуто высокое значение H_{gradH} . При $l \geq 0,5S$ магнитное поле станет однородным на участке, прилегающем к плоскому полюсу.

Неоднородность магнитного поля создает также кривизна валика, ролика, характеризующаяся радиусом R . Уменьшение радиуса ролика приведет к некоторому повышению магнитной силы. Однако с уменьшением радиуса валика (ролика) снизится длина рабочей зоны L (см. рис. 2.2). Кроме того, основную неоднородность поля создают зубцы валика, а не радиус валика. На практике применяют валки и ролики диаметром от 100 до 380 мм.

Для расчета магнитного поля, образуемого сочетанием плоского и многозубчатого полюсов (см. рис. 2.4, а и б) используются следующие формулы:

$$H_x = H_l \left[1 - c \left(\frac{0,5S - x}{0,5S} \right)^n \right]^{-0,5}; \quad (2.13)$$

$$H_{gradH_x} = H_l^2 n c y^{n-1} / [S(1 - cy^n)^2], \quad (2.14)$$

где H_x – напряженность поля на расстоянии x от зубца, А/м; H_l – напряженность у плоского полюса ($x=l$), А/м; S – шаг зубцов валика, м; c – параметр, зависящий от формы зубцов и их шага; n – параметр, зависящий от формы сечения зубцов ($n \approx 2$ – треугольное сечение; $n \approx 1,5$ – прямоугольное сечение); $y = (S-x)/S$.

Параметр c изменяется от 0,3 до 0,6 при увеличении S от 0,01

до 0,03 м (треугольное сечение) и от 0,17 до 0,3 при увеличении S от 0,01 до 0,05 м (прямоугольное сечение).

В формулах (2.13) и (2.14) используется величина напряженности магнитного поля у плоского полюса (H_l). Если известна напряженность магнитного поля у зубца ($x=0$), то формулы (2.13) и (2.14) для зубчатой формы полюса имеют вид:

$$H_x = \frac{0,5SH_0(1-c)^{0,5}}{\left[0,25S^2 - c(0,5S-x)^2\right]^{0,5}}; \quad (2.15)$$

$$H_{\text{grad}H} = \frac{0,25S^2 H_0^2 c(0,5S-x)(1-c)}{\left[0,25S^2 - c(0,5S-x)^2\right]^2}, \quad (2.16)$$

где H_0 – напряженность магнитного поля вблизи зубцов, А/м.

Формулами (2.13) – (2.16) можно пользоваться для расчета приблизительной характеристики магнитного поля при условиях: $l \leq 0,5S$; $2\alpha = 45-50^\circ$; радиус закругления края зубцов – $0,1S$.

Для расчета магнитного поля, образуемого сочетанием гиперболических полюсов (см. рис. 2.4, в) используются формулы:

$$H_x = \frac{H_0 l \sin \alpha_2}{\left[l^2 - (l \cos \alpha_2 - kx)^2\right]^{0,5}}; \quad (2.17)$$

$$H_{\text{grad}H} = \frac{kH_0^2 l^2 \sin^2 \alpha_2 (l \cos \alpha_2 - kx)}{\left[l^2 - (l \cos \alpha_2 - kx)^2\right]^2}, \quad (2.18)$$

где k – коэффициент, равный $\cos \alpha_2 - \sin \alpha_1$.

Для расчета магнитного поля, образуемого сочетанием многозубчатого полюса (валок) и неподвижного полюса с выемками (см. рис. 2.4, з), можно с приближением пользоваться равенствами (2.17-2.18). Учитывая, что наличие соседних зубцов несколько ослабляет силу магнитного поля в формулы (2.17-2.18) необходимо ввести поправочный коэффициент 0,7-0,8.

Для шага зубцов $S \leq 0,05$ м можно приближенно воспользоваться следующими формулами:

$$H_x = H_l [1 + m(l-x)]; \quad (2.19)$$

$$H_{\text{grad}H} = mH_l^2 [1 + m(l-x)], \quad (2.20)$$

где m – параметр, равный $(H_0 - H_l)/(lH_l)$, см⁻¹.

2.4. Динамика движения частиц при магнитной сепарации

По характеру перемещения исходного продукта через рабочую зону все сепараторы можно разделить на аппараты с верхней подачей и нижней. Разделение может осуществляться в воздушной и в водной среде.

При расчете траекторий движения частиц в рабочих зонах сепараторов использованы удельные силы, отнесенные к единице массы $f=F/m$.

Движение частиц руды в сепараторах с верхней подачей

В сепараторах с верхней подачей материала частицы руды подаются на барабан или валок и транспортируются им в зону разделения. В зависимости от суммарного действия на частицу магнитной и механической сил частица оторвется от барабана при определенном угле его поворота. Если магнитная сила, действующая на частицу, намного превышает результирующую механических сил, то частица оторвется от барабана на участке окончания магнитной системы ($f_m=0$) при большом угле поворота барабана. Если магнитная сила, действующая на частицу, намного меньше суммарных механических сил, то частица оторвется от барабана при малом угле его поворота.

При движении частицы через рабочую зону сепаратора с верхней подачей на частицу будут действовать силы: магнитная; сила тяжести; центробежная; сила трения (рис. 2.5, а). По Дациуку И. С., чтобы частица не смещалась по поверхности барабана, необходимо, чтобы сила трения была больше тангенциальной составляющей силы тяжести:

$$\operatorname{tg} \varphi(f_m + g \cos \alpha - f_{\text{ц}}) \geq g \sin \alpha. \quad (2.21)$$

Магнитные частицы притягиваются к поверхности барабана (к магнитной системе) с различной силой, зависящей от их магнитной восприимчивости, которая, в свою очередь, зависит от содержания в частице магнитного минерала. Обычно магнитный сепаратор принимают таким, чтобы он обеспечивал притяжение к барабану (валку) частицы с заданным минимальным содержанием магнитного минерала. Такая частица называется *граничной*, а значение её маг-

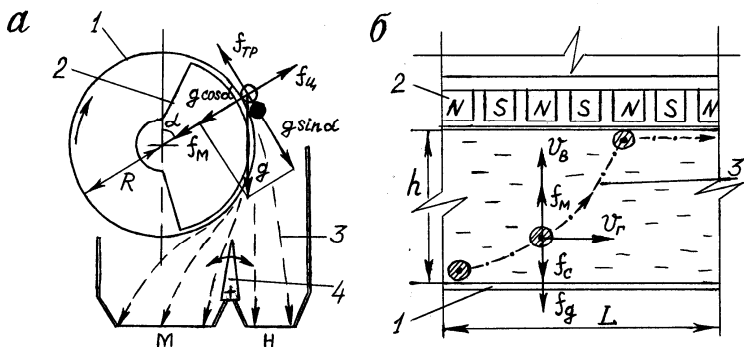


Рис. 2.5. Схема сил, действующих на частицы в сепараторах:

a – сепаратор с верхней подачей материала (сухое обогащение): 1 – барабан; 2 – магнитная система; 3 – траектория движения частицы; 4 – шибер; *б* – сепаратор с нижней подачей (мокрое обогащение): 1 – ванна; 2 – магнитная система; 3 – траектория движения частицы

нитной восприимчивости – *границей разделения* магнитного сепаратора (χ_p). При этом частицы с величиной $\chi > \chi_p$ попадут в концентрат, а частицы с $\chi < \chi_p$ – в хвосты. Попадание граничной частицы в концентрат или хвосты равновероятно.

Удельная магнитная сила, необходимая для извлечения граничной магнитной частицы при отсутствии скольжения частиц:

$$f_M \geq f_{ц} - g \cos \alpha + g \sin \alpha / \operatorname{tg} \varphi = f_{ц} + g \sin (\alpha - \varphi) / \sin \varphi; \quad (2.22)$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент трения; α – угол поворота барабана (угол положения частицы на барабане, град.

Условие (2.22) справедливо для движения единичной частицы с вращающимся барабаном сепаратора. В том случае, когда в обогащаемой руде содержатся магнитные частицы, сильно притянутые к барабану, они не позволяют менее богатым кускам руды смещаться по поверхности барабана (скользить) под влиянием тангенциальной составляющей силы тяжести $g \sin \alpha$. Кроме того, если сильно-магнитная частица находится перед немагнитной частицей, то воз-

никнет добавочная сила трения (трение между частицами), которая будет способствовать отрыву немагнитной частицы при большем угле поворота барабана. Поэтому величину удельной магнитной силы, необходимой для извлечения граничных магнитных частиц, можно уменьшить на коэффициент b , пропорциональный содержанию магнитных частиц в исходном продукте. При содержании магнитных частиц в исходной руде от 0,3 до 0,9 д. ед. величина коэффициента b примерно равна $(1+\alpha_m)$. Удельная магнитная сила, необходимая для извлечения граничной магнитной частицы при движении слоя материала:

$$f_m \geq (f_{ц} - g \cos \alpha) / (1 + \alpha_m), \quad (2.23)$$

где α_m – содержание сильномагнитных частиц в исходной руде, д. ед.

Используя равенство (2.23), можно определить параметры и режимы работы магнитного сепаратора, при которых частицы с магнитными свойствами, большими, чем у граничной частицы, попадут в концентрат (магнитный продукт). К характеристикам магнитного сепаратора, которые можно определить из условия (2.23), относятся: напряженность магнитного поля на поверхности полюса H_0 , полюсный шаг S , расстояние от поверхности полюса до частицы Δ , скорость вращения барабана v и его радиус R . Определение характеристик сепаратора необходимо проводить для частиц заданной крупности.

Если величина χ_p неизвестна, можно рассчитать углы отрыва частиц от барабана. Зная угол отрыва частиц с различными свойствами от барабана, можно рассчитать траектории движения частиц и определить, в какой продукт попадет та или иная частица. Имея количественные и качественные характеристики частиц, попавших в приемники для магнитного и немагнитного продуктов, можно определить технологические показатели обогащения для магнитного сепаратора с заданными параметрами и режимами работы. Угол отрыва частицы от барабана, согласно (2.23):

$$\alpha = \arccos[(f_{ц} - f_m(1 + \alpha_m)) / g]. \quad (2.24)$$

Расчет траектории движения частицы после отрыва от поверхности вращающегося барабана сравнительно прост, если принять, что на частицу после её отрыва, действует только сила тяжести. В этом случае закон движения в горизонтальном направлении можно принять равномерным, а в вертикальном – равноускоренным:

$$\left. \begin{aligned} x_t &= x_0 + v_{\Gamma} t; \\ y_t &= y_0 + v_{\text{в}} t + \frac{gt^2}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

Если принять за начало координат верхнюю точку барабана, направление оси абсцисс – слева направо, направление оси ординат – сверху вниз, то координаты точки отрыва частицы от барабана: $x_0=R\sin\alpha$; $y_0=R-R\cos\alpha$. Начальная скорость движения частицы в момент отрыва от барабана: $v_{\Gamma}=v\cos\alpha$; $v_{\text{в}}=v\sin\alpha$. Задаваясь значениями координат $x_{\text{в}}$, находим по системе уравнений (2.25) значения координат y_t и определяем траекторию движения частицы после отрыва от барабана.

Если при расчете траектории учитывать силу сопротивления воздуха и магнитную силу, то для определения траектории движения частицы необходимо применить численные методы решения дифференциальных уравнений на ЭВМ.

Движение частиц руды в сепараторах с нижней подачей при мокром обогащении

В сепараторах с нижней подачей материала частицы материала подаются под барабан (валок) сепаратора. При сепарации необходимо добиться, чтобы магнитные частицы, пройдя в горизонтальном направлении путь длиной L , равный длине ванны сепаратора (длине рабочей зоны), успели сместиться в вертикальном направлении на расстояние h , равное высоте рабочей зоны сепаратора (рис. 2.5, б). При выполнении данного условия магнитные частицы извлекаются из общего потока материала, притянутся к магнитной системе и вынесутся барабаном в зону разгрузки. При расчете траектории рассматривается граничная частица, находящаяся на дне ванны сепаратора, поскольку если эта частица успеет пройти в вертикальном направлении путь h , находясь в рабочей зоне сепаратора, то все другие ча-

стицы с $\chi > \chi_p$ успеют извлечься из потока материала независимо от их начального положения при входе в ванну сепаратора (по высоте).

При мокрой магнитной сепарации и при нижней подаче материала частицы обычно перемещаются по криволинейной траектории, вдоль поверхности барабана или вала. Условно можно представить сечение ванны в виде прямоугольника (см. рис. 2.5, б). За начало координат принимается нижняя точка ванны сепаратора в месте начала рабочей зоны, направление оси абсцисс – слева направо (от 0 до L), направление оси ординат – снизу вверх (от 0 до h).

Рассмотрим силы, действующие на частицу в ванне сепаратора. В установившемся режиме частица движется в горизонтальном направлении со скоростью пульпы (v_r) в направлении вектора ее движения. На этом основании можно считать, что скорость частицы относительно скорости пульпы равна нулю, и все силы, действующие по горизонтали, скомпенсированы. Следовательно, в горизонтальном направлении частица не испытывает воздействия сил и движется равномерно со скоростью пульпы v_r .

В вертикальном направлении на частицу действуют силы: тяжести, магнитная и вязкостного сопротивления.

Сила тяжести, уменьшенная на величину силы Архимеда, вычисляется по формуле

$$F_g = g(\rho - \rho_c)/\rho, \quad (2.26)$$

где ρ , ρ_c – плотность соответственно частицы и воды, кг/м^3 ; g – ускорение силы тяжести, м/с^2 .

В противоположном направлении на частицу действует магнитная сила, которая при достаточно малом размере частицы может быть представлена в виде

$$f_m = \mu_0 \chi H \text{grad} H.$$

Величину $H \text{grad} H$ можно рассчитать по формуле (2.10) при расстоянии до полюса сепаратора, равном h . При движении частицы к барабану сепаратора магнитная сила будет увеличиваться, согласно формуле (2.10), так как расстояние до полюса равно $h - y_t$ (y_t – текущая координата частицы). С некоторым допущением примем величину магнитной силы постоянной, равной силе, действующей на расстоянии h от барабана сепаратора.

При перемещении частицы в пульпе возникает сила вязкостного сопротивления (сила сопротивления среды), зависящая от вертикальной составляющей скорости перемещения частицы и направленная против этой скорости. Для частиц крупностью менее 0,1 мм сила сопротивления изменяется по закону Стокса:

$$f_c = 18\mu v_b / (\rho d^2), \quad (2.27)$$

где μ - коэффициент динамической вязкости (для воды $\mu = 10^{-3}$ Н·с/м²); d - диаметр частицы, м; v_b - вертикальная составляющая скорости частицы, м/с.

Сила вязкостного сопротивления направлена противоположно равнодействующей сил f_m и f_g . При увеличении содержания твердого в пульпе увеличивается её кажущаяся вязкость и плотность и, следовательно, сила сопротивления среды. С некоторым допущением силу сопротивления будем рассчитывать по формуле (2.27) при значении μ для воды.

В начальный момент времени при поступлении частицы в рабочую зону сепаратора сила сопротивления будет равна нулю ($v_b = 0$). Частица начнет движение в вертикальном направлении (к барабану сепаратора) при $f_m > f_g$. Уравнение движения частицы в вертикальном направлении запишется следующим образом:

$$dv_b/dt = f_m - f_g - f_c. \quad (2.28)$$

Заменим $f_m - f_g$ на a и $18\mu/(\rho d^2)$ на b . После преобразований и подстановки уравнение движения частицы в вертикальном направлении представляет собой линейное дифференциальное уравнение 1-го порядка:

$$dt = dv_b / (a - bv_b).$$

Решение дифференциального уравнения дает формулу для расчета перемещения частицы в вертикальном направлении

$$y_t = \frac{a}{b} \left(t + \frac{e^{-tb}}{b} \right) - \frac{a}{b^2}. \quad (2.29)$$

Примем, что в вертикальном направлении частица прошла путь $y_t = h$. Для притяжения частицы к барабану сепаратора необхо-

димо, чтобы частица в горизонтальном направлении за то же время t прошла путь, меньший или равный L . Время, за которое частица пройдет путь L :

$$t=L/v_r. \quad (2.30)$$

Подставим в формулу (2.29) вместо y_t величину h , вместо t зависимость (2.30), а вместо a – разность $f_m - f_g$ и выразим значение магнитной силы:

$$f_m \geq f_g + h/\left[\frac{1}{b}\left(\frac{L}{v_r} + \frac{e}{b} \frac{\frac{L}{v_r}}{b} - \frac{1}{b}\right)\right], \quad (2.31)$$

где b – коэффициент, равный $18\mu/(p d^2)$, c^{-1} .

Величина f_m , рассчитанная по формуле (2.31), будет характеризовать магнитную силу, при которой в магнитный продукт попадут частицы с $\chi \geq \chi_p$, а частицы с $\chi < \chi_p$ попадут в немагнитный продукт.

Если условие (2.31) выполняется (частица с $\chi \geq \chi_p$ притянулась к барабану), то на частицу начнёт действовать центробежная сила, стремящаяся оторвать частицу от барабана. Поэтому необходимо выполнить проверку на возможность транспортировки барабаном частицы с величиной $\chi \geq \chi_p$ в зону разгрузки сепаратора. При этом рассчитывается максимально допустимая скорость вращения барабана определённого радиуса.

Используя равенство (2.31), можно определить характеристики и режимы работы магнитного сепаратора, при которых частицы с магнитными свойствами, большими, чем у граничной частицы, попадут в концентрат (магнитный продукт). К характеристикам магнитного сепаратора, которые можно определить из условия (2.31), относятся: напряженность магнитного поля на поверхности полюса H_0 , полюсный шаг S , расстояние от поверхности полюса до границы частицы Δ , скорость движения пульпы v_r (определяет производительность), длина и высота рабочей зоны (L и h). Данные определения необходимо проводить для частиц заданной крупности и плотности.

Можно решить обратную задачу: для частиц с разными значениями магнитной восприимчивости найти траектории их движения и определить вероятность попадания частиц в магнитный продукт в зависимости от начального положения частицы (по высоте ванны сепаратора). Траектория движения определяется по равенствам (2.29) и $x_t = v_t t$.

Для повышения точности расчётов магнитную силу необходимо определять по равенству (2.11), но это приведет к использованию численных методов решения на ЭВМ. Кроме того, поток пульпы перемещается в ванне сепаратора по криволинейной траектории, что вызывает дополнительную центробежную силу, направленную против магнитной силы, и коэффициент динамической вязкости μ будет зависеть от содержания твердого в пульпе и других факторов, что также можно учесть для повышения точности расчетов.

3. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ

Магнитные свойства сильномагнитных минералов не являются постоянными физическими величинами и изменяются в зависимости от напряженности внешнего намагничивающего поля, предыдущего магнитного состояния тела, крупности и формы частиц.

Принято различать магнитную восприимчивость (объёмную) и удельную магнитную восприимчивость. Для сильномагнитных минералов различают магнитную восприимчивость тела и вещества.

Объёмная магнитная восприимчивость тела – магнитный момент единицы объёма этого тела, возникающий при его намагничивании в поле напряжённостью 1 А/м:

$$\alpha = I/H, \quad (3.1)$$

где I – намагничённость тела, А/м.

Намагничённостью тела называется магнитный момент единицы объёма тела

$$I = M/V, \quad (3.2)$$

где M – магнитный момент, А·м².

Магнитная восприимчивость является безразмерной величиной.

Удельная магнитная восприимчивость равна отношению объёмной восприимчивости на плотность, м³/кг:

$$\chi = \alpha / \rho. \quad (3.3)$$

Удельная магнитная восприимчивость тела – магнитный момент единицы массы этого тела при его намагничивании в поле с напряженностью 1 А/м.

Магнитная восприимчивость тела учитывает форму частицы, а магнитная восприимчивость вещества не учитывает. Первая по величине меньше, в зависимости от коэффициента размагничивания N , который связан с формой частицы.

При помещении ферромагнитного тела во внешнее магнитное поле с напряженностью H в теле возникает собственное магнитное поле с H_0 , направленное против внешнего поля. Это поле называется размагничивающим, его напряжённость

$$H_0 = NI. \quad (3.4)$$

Магнитное поле H_B – действительно намагничивающее ферромагнитное поле меньше внешнего поля на величину размагничивающего поля:

$$H_B = H - H_0 = H - NI. \quad (3.5)$$

Магнитная восприимчивость тела α_0 определяется отношением намагниченности к внешнему полю H , магнитная восприимчивость вещества α определяется отношением намагниченности к внутреннему полю H_B :

$$\alpha_0 = I/H; \quad (3.6)$$

$$\alpha = I/H_B. \quad (3.7)$$

Магнитная восприимчивость (объёмная и удельная) тела связана с восприимчивостью вещества в соответствии с коэффициентом размагничивания N :

$$\alpha_0 = \alpha / (1 + N\alpha); \quad (3.8)$$

$$\chi_0 = \chi / (1 + N\rho\chi), \quad (3.9)$$

где χ_0 и χ - удельная магнитная восприимчивость соответственно тела и вещества, м³/кг.

Коэффициент размагничивания N зависит от формы тела. Для бесконечно длинного стержня, ось которого совпадает с направлением H поля, коэффициент $N=0$, а для тонкого диска, расположенно-

го перпендикулярно H поля, коэффициент размагничивания равен 1, для шара $N=0,333$. Коэффициент размагничивания изменяется от 0 до 1. Для эллипсоидов вращения при расположении длинной оси $2a$ вдоль поля, а короткой оси $2b$ – перпендикулярно полю коэффициент размагничивания приведён в табл. 3.1.

Таблица 3.1
Величина коэффициента размагничивания N

a/b	0 (тонкий диск)	0,5	1,0 (шар)	2,0	5,0	10,0	50,0	∞ (стержень)
N	1,000	0,56	0,333	0,176	0,056	0,020	0,0015	0

Для частиц магнетита, обычно несколько вытянутых в одном направлении, коэффициент размагничивания можно в среднем принять равным 0,16.

Важнейшей характеристикой ферромагнитных веществ и минералов является зависимость намагничённости и магнитной индукции от напряжённости внешнего магнитного поля (рис. 3.1). Впервые это явление установил в 1871 г. А. Г. Столетов. При одной и той же напряжённости поля H намагничённость I и магнитная индукция B ферромагнитного вещества могут иметь разные значения, в зависимости от предыдущего магнитного состояния материала.

На рис. 3.1 приведена кривая намагничивания и петля гистерезиса ферромагнитного тела. Кривая $OABD$ является первичной кривой намагничивания ферромагнитного тела при увеличении напряжённости поля от 0 до H_3 . Если в дальнейшем уменьшить напряжённость магнитного поля от H_3 до 0 и при этом измерить индукцию и намагничённость тела, то кривая $DB'A'E$ пройдёт выше первоначальной кривой $OABD$. Явление отставания изменения индукции и намагничённости от изменения H поля называется *магнитным гистерезисом*. Петля гистерезиса, приведённая на рис. 3.1, получается при последовательном изменении H поля от 0 до $+H_{\max}$, затем до $H_{\min}$ и обратно. По петле гистерезиса индукции определяются *остаточная индукция* B_r (при $H=0$) и *коэрцитивная сила* H_c (при $B=0$) ферромагнитного тела.

Остаточная индукция B_r свидетельствует о том, что элементарные токи в ферромагнитном теле, несмотря на исчезновение внешнего поля, частично сохранили упорядоченную ориентацию. Коэрцитивная сила H_c характеризует величину напряжённости поля обратного направления, которую необходимо создать, чтобы остаточная индукция стала равной нулю.

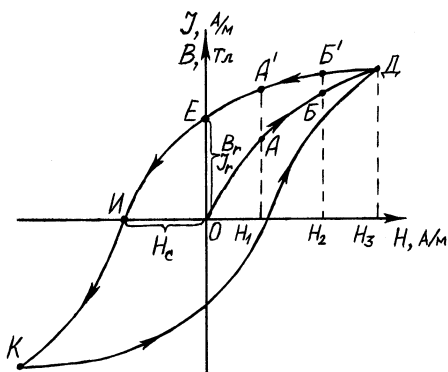


Рис. 3.1. Петля гистерезиса

При отложении на оси ординат вместо индукции B значений намагниченности I получается петля гистерезиса по намагниченности. По этой петле определяют остаточную намагниченность I_r и коэрцитивную силу H_c гистерезисной петли намагничения.

Остаточная индукция и коэрцитивная сила являются важными характеристиками ферромагнитного тела. Ферромагнитные вещества, имеющие малые значения коэрцитивной силы (меньше 8 кА/м), называются *магнитномягкими*, а обладающие большой коэрцитивной силой (несколько десятков кА/м и более), - *магнитножесткими*. Из первых изготавливаются магнитопроводы и полюсные наконечники магнитных систем сепараторов, из вторых при большой их магнитной энергии – постоянные магниты.

3.1. Классификация минералов по магнитным свойствам

По величине магнитной восприимчивости минералы делятся на три группы: сильномагнитные или ферромагнитные ($\chi > 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$); слабомагнитные или парамагнитные ($7,5 \cdot 10^{-6} > \chi > 1,26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$); немагнитные ($\chi < 1,26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$) и диамагнитные ($\chi < 0$).

К сильномагнитным минералам относятся магнетит Fe_3O_4 , маггемит $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, франклинит $(\text{Zn}, \text{Mn})\text{Fe}_2\text{O}_4$, пирротин $\text{Fe}_n\text{S}_{n+1}$ и др. Сильномагнитные минералы обогащаются в сепараторах со слабым магнитным полем с напряженностью до 160 кА/м.

Магнитная восприимчивость слабомагнитных минералов во много раз меньше, чем у сильномагнитных, поэтому их обогащают в сепараторах с сильным полем с напряженностью от 280 до 1600 кА/м. К слабомагнитным минералам относятся оксиды, гидроксиды и карбонаты железа и марганца, ильменит, вольфрамит, гранат и др. Нижний предел величины удельной магнитной восприимчивости слабомагнитных минералов, которые можно обогащать магнитным методом, снижается с разработкой сепараторов с более сильным магнитным полем.

Немагнитные минералы магнитным способом не обогащаются, но их можно обогащать по плотности феррогидростатической сепарацией.

3.2. Определение магнитных свойств минералов

Определение магнитной восприимчивости минералов основано на взвешивании образцов, помещённых в магнитное поле. Чем больше прирост “массы” образца в магнитном поле, тем выше его магнитные свойства.

Для определения магнитной восприимчивости слабомагнитных минералов применяют пондеромоторный метод, предложенный Фарадеем. Магнитную восприимчивость образца определяют косвенным методом – сравнивают магнитные силы, действующие на исследуемый образец и эталон.

Установка для определения магнитной восприимчивости пондеромоторным методом состоит из электромагнита 4 и весов 1, которыми измеряется сила притяжения исследуемых образцов (рис. 3.2, а). Электромагнит имеет полюса со скошенными поверхностями, создающими изодинамическое поле ($H \text{grad} H = \text{const}$). Все части весов установки изготавливаются из немагнитного материала. Между весами и электромагнитом устанавливается ферромагнитная плита 2 для экранирования магнитного поля.

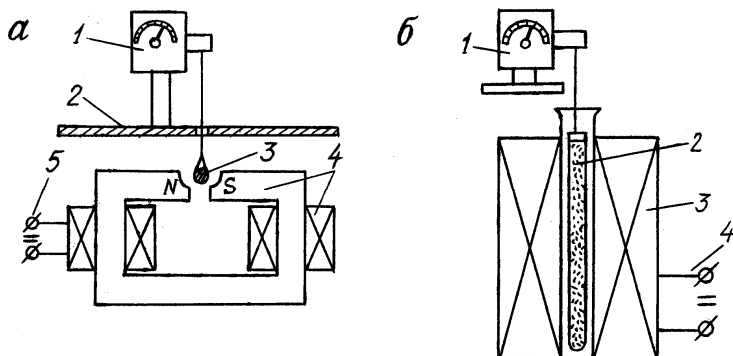


Рис. 3.2. Установки для определения магнитных свойств:
а – слабомагнитных минералов: 1 – весы; 2 – ферромагнитный экран; 3 – колбочка с образцом; 4 – электромагнит; 5 – источник постоянного тока; *б* – сильномагнитных минералов: 1 – весы; 2 – стеклянный цилиндр с образцом; 3 – электромагнит (соленоид); 4 – источник постоянного тока

Порошок слабомагнитного материала насыпают в стеклянную колбочку до метки и помещают в зазор между полюсами. После этого включают заданный ток в обмотке электромагнита и определяют “массу” образца в магнитном поле. То же самое выполняется с колбочкой, заполненной эталоном. В качестве эталона используются чистые минералы или химические соединения, например пирофосфат марганца $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ($\chi=8,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$), хлористый марганец MnCl_2 ($\chi=14,45 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$), фтористый кобальт CoF_2 ($\chi=9,55 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$). Кроме взвешивания образца и эталона в магнитном поле выполняются взвешивания при выключенном электромагните.

Измерения выполняют три-четыре раза, а затем по средним значениям рассчитывают удельную магнитную восприимчивость образца по формуле

$$\chi_{\text{об}} = \chi_{\text{эт}} m_{\text{эт}} \Delta m_{\text{об}} / (m_{\text{об}} \Delta m_{\text{эт}}), \quad (3.10)$$

где $\chi_{\text{эт}}$ – удельная магнитная восприимчивость эталона, $\text{м}^3/\text{кг}$; $m_{\text{эт}}$ – масса эталона, кг; $m_{\text{об}}$ – масса образца, кг; $\Delta m_{\text{об}}$ – кажущийся прирост массы образца в магнитном поле, кг; $\Delta m_{\text{эт}}$ – кажущийся прирост массы эталона в магнитном поле, кг.

Для определения магнитной восприимчивости сильномагнитных минералов применяют метод Гюи. Он основан на измерении силы, действующей на измельченный образец, помещённый в длинный стеклянный цилиндр. Стеклянный цилиндр помещается в соленоидную катушку так, что один конец будет находиться в сильном магнитном поле, а другой - в слабом (рис. 3.2, б). При этом цилиндр будет втягиваться в соленоид с усилием, зависящим от магнитных свойств образца.

Магнитная сила, втягивающая цилиндр внутрь катушки:

$$F_m = g \Delta m = 0,5 \mu_0 \chi \rho_n S (H^2 - H_1^2), \quad (3.11)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с; Δm – кажущийся прирост массы образца в магнитном поле, кг; χ – удельная магнитная восприимчивость образца, м³/кг; ρ_n – насыпная плотность образца, кг/м³; S – площадь сечения образца, м²; H, H_1 – напряжённость сильного и слабого магнитных полей, А/м.

При достаточно большой длине цилиндра его верхний край удалён от полюсов магнитной системы на большое расстояние ($H_1=0$). Учитывая, что $m = \rho_n S l$, заменим в формуле (3.11) $\rho_n S$ на m/l , где m – масса образца, кг; l – длина образца в трубке, м. Из равенства (3.11) найдем величину χ :

$$\chi = 2lg \Delta m / (\mu_0 H^2 m). \quad (3.12)$$

Задача эксперимента заключается в определении Δm и последующих расчётах по формуле (3.12).

Этот метод позволяет определить не только удельную магнитную восприимчивость, но и значения намагничённости с магнитной индукцией образца для построения петли гистерезиса. Для этого необходимо выполнить измерения χ при последовательном изменении H поля от 0 до $+H_{\max}$, затем до $H_{\min}$ и обратно. Далее выполняется переход от значений магнитной восприимчивости к намагничённости и индукции ферромагнитного тела по следующим формулам:

$$I = \alpha H = \chi \rho_n H; \quad (3.13)$$

$$B = \mu_0 (H + NI), \quad (3.14)$$

3.3. Магнитные свойства магнетита

Магнитные свойства магнетита зависят от напряжённости внешнего магнитного поля и от формы образца.

В табл. 3.2 приведены результаты измерений магнитных свойств вещества магнетит Высокогорского месторождения на установке, исключающей размагничивающее влияние полюсов исследуемых образцов. Из данных табл. 3.2 видно, что максимальные значения удельной магнитной восприимчивости достигаются в поле с напряжённостью 8 кА/м и составляют $18,73 \cdot 10^{-4}$ ($27,48 \cdot 10^{-4}$).

Сепарация магнетита осуществляется в магнитных полях с напряжённостью 60 – 120 кА/м. В этом диапазоне полей удельная магнитная восприимчивость вещества магнетит составляет в среднем $8 \cdot 10^{-4}$ м³/кг.

Единичные частицы магнетита обычно несколько вытянуты в одном направлении, поэтому для них коэффициент размагничивания N принимают равным 0,16. Для единичных частиц магнетита при их плотности 5000 кг/м³ удельная магнитная восприимчивость тела, рассчитанная по формуле (3.9), в поле 60 – 120 кА/м равна $5 \cdot 10^{-4}$ м³/кг.

Таблица 3.2

Удельная магнитная восприимчивость вещества магнетит [1]

Напряжённость намагничивающего поля H , кА/м	Удельная магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^{-4}$, м ³ /кг	
	по Г. Н. Петровой	по В. Х. Готшалку
240	-	3,46
160	-	5,00
96	-	7,59
64	9,53	10,00
48	11,13	11,72
32	15,25	14,03
24	18,00	15,31
16	22,45	16,88
8	27,48	18,73
4	16,50	18,00
2	14,00	18,00

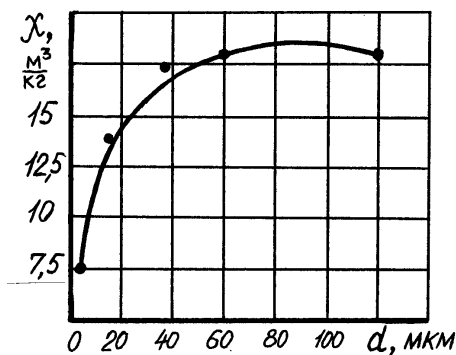


Рис. 3.3. Зависимость удельной магнитной восприимчивости магнетита от крупности частиц (по В. Х. Готшалку)

Для более мелких и тонких частиц, образующих в магнитном поле вытянутые пряди ($N \approx 0$), удельная магнитная восприимчивость тела и вещества равны и составляют в среднем $8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Магнитные свойства магнетита зависят от крупности частиц (рис. 3.3). С уменьшением крупности зёрен магнетита от 0,04 мм его магнитная восприимчивость снижается более чем в два раза – с $17,7 \cdot 10^{-4}$ до $7,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ [1].

Удельная магнитная восприимчивость куска руды, содержащего определённое количество магнетита, зависит практически только от процентного содержания в нём магнетита.

Объёмную магнитную восприимчивость сростка магнетита с другими минералами можно рассчитать по формуле

$$\alpha_{\text{ср}} \approx 10^{-4} \alpha^2 \alpha_0, \quad (3.15)$$

где α - содержание магнетита в сростке, %; α_0 - объёмная магнитная восприимчивость частиц чистого магнетита.

Удельную магнитную восприимчивость сростков магнетита с другими минералами для отдельных сростков и для мелких и тонких зёрен, образующих пряди, можно рассчитать по формулам:

$$\chi_{\text{ср}} \approx 1,13 \cdot 10^{-5} \alpha^2 / (127 + \alpha); \quad (3.16)$$

$$\chi_{\text{ср}} \approx 1,8 \cdot 10^{-5} \alpha^2 / (127 + \alpha). \quad (3.17)$$

Формулы (3.16) и (3.17) получены после преобразования формулы (3.15) при плотности магнетита, равной $5000 \text{ кг}/\text{м}^3$, и плотности породы, равной $2800 \text{ кг}/\text{м}^3$. Удельная магнитная восприимчи-

вость (тела) магнетита в формуле (3.16) принята равной $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$, а в формуле (3.17) – $8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$.

3.4. Магнитная восприимчивость различных минералов

Пирротин, относящийся к сильномагнитным минералам, имеет удельную магнитную восприимчивость $7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$ в поле 24 кА/м. Удельная магнитная восприимчивость ферросилиция, применяющегося при тяжелосреднем обогащении, зависит от процентного содержания в нём железа и составляет от $8 \cdot 10^{-5}$ до $7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$.

В отличие от сильномагнитных минералов магнитные свойства слабомагнитных минералов не зависят от формы частиц и напряжённости намагничивающего поля.

Наиболее полно изучены магнитные свойства марганцевых и железных слабомагнитных минералов. Значения удельной магнитной восприимчивости слабомагнитных марганцевых, железных и других минералов приведены в табл. 3.3 - 3.5 [1, 2, 3, 4].

Таблица 3.3
Удельная магнитная восприимчивость марганцевых минералов

Минералы	Содержание в чистом минерале Mn, %	Удельная магнитная восприимчивость, $10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$
Пирролюзит (MnO_2)	63,1	3,8
Манганит ($\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	62,5	6,2
Гаусманит (Mn_3O_4)	72,0	7,2
Вернадит ($\text{MnO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$)	До 52,1	5,2
Землистые разности псиломелана - - вад ($n\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot m\text{MnO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$)	До 49,6	6,5
Псиломелан плотный ($n\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot m\text{MnO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$)	До 49,6	8-8,5
Браунит (Mn_2O_3)	69,6	15,3
Псиломелан неплотный ($n\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot m\text{MnO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$)	До 49,6	10-12
Родохрозит (MnCO_3) и манганокальцит	42	17,2

Таблица 3.4

Удельная магнитная восприимчивость некоторых минералов

Минералы	Удельная магнитная восприимчивость, $10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$
<u><i>Сильномагнитные</i></u>	
Маггемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)	5000-6000
Титаномагнетит ($\text{Fe}(\text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_2\text{O}_4$)	3000-4000
Пирротин ($\text{Fe}_n\text{S}_{n+1}$)	63-700
<u><i>Слабомагнитные</i></u>	
Амфибол (2,11 % Fe)	11,3
Биотит	5-6,5
Вольфрамит	8,3-11,9
Глауконит	7,9
Гюбнерит	10,3
Гранат (21,7 % Fe)	20
Гранат	7,9
Доломит	До 3,4
Ильменит	14,2-33
Монацит	1,8
Мусковит, биотит	0,5-3
Пироксен (3,05 % Fe)	8,2
Роговая обманка	0,5-3
Ставролит	4,6
Тальк (2,2 % Fe)	2,8
Халькопирит	1-2
Эгирин (19,7 % Fe)	10,7
<u><i>Немагнитные минералы</i></u>	
Апатит	0,126
Дистен	0,5
Касситерит	0,6
Кальцит	-0,05
Кварц	-0,02+0,1
Пирит	0,1
Полевой шпат	0,63
Рутил	0,2-0,6
Танталит-колумбит	0,2-1,1
Турмалин	0,1-1,25
Циркон	-0,1+0,4

Таблица 3.5

Удельная магнитная восприимчивость слабомагнитных железных минералов

Минералы	Содержание в чистом минерале Fe, %	Удельная магнитная восприимчивость, $10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$
Мартит (Fe_2O_3)	70	До ≈ 88
Мартит с большой примесью гематита	70	До ≈ 44
Железистая слюдка-спекулярит (Fe_2O_3)	70	До ≈ 37
Гематит (Fe_2O_3)	70	От 8,8 до 22
Сидерит (FeCO_3)	48,2	$\approx 7,5$
Бурый железняк ($n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$)	До 60	От 4 до 9
Гетит ($\text{FeO} \cdot \text{OH}$)	62,9	$\approx 3,2$
Лимонит ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)		2-3

3.5. Влияние магнитных свойств разделяемых частиц на процесс магнитного обогащения

Магнитная восприимчивость извлекаемых в магнитный продукт частиц определяет выбор напряжённости магнитного поля сепаратора (со слабым или с сильным полем).

Мелкие и тонкие частицы магнетита или другого сильномагнитного материала в магнитном поле образуют флоккулы и пряди, ориентируемые вдоль магнитных силовых линий. Коэффициент разматывания прядей меньше, чем у отдельной частицы, а удельная магнитная восприимчивость – больше. Магнитные пряди и флоккулы образуются вследствие наличия остаточной намагниченности и коэрцитивной силы у сильномагнитных минералов после прохождения через магнитное поле.

Образование магнитных прядей из сильномагнитных частиц положительно влияет на извлечение тонких частиц, так как магнитная восприимчивость пряди выше, чем у отдельной частицы. Кроме того, сопротивление водной среды при перемещении пряди к полюсам сепаратора ниже, чем у отдельных частиц (при мокром обогащении).

С другой стороны, образование прядей и флокул снижает качество железных концентратов, так как в пряди “захватываются” немагнитные мелкие частицы, трудно удаляемые при сепарации.

Свойство сильномагнитных измельчённых частиц образовывать флоккулы и пряди по-разному влияет на различные технологические операции схем обогащения.

Явление магнитной флокуляции отрицательно сказывается при классификации магнетитовых продуктов, так как флоккулы попадают в пески и далее в мельницу. Кроме того, более крупные и тяжёлые флоккулы оседают на дно спиральных классификаторов, затрудняя процесс классификации. Большое содержание магнитных флоккул в железных концентратах также отрицательно влияет на процесс их фильтрования, снижая производительность фильтров и повышая влажность осадка.

Для повышения эффективности процессов классификации намагниченных пульп и фильтрования железных концентратов эти продукты подвергают размагничиванию с целью дефлокуляции частиц магнетита. Размагничивание продуктов осуществляют в переменном магнитном поле в размагничивающих аппаратах.

Явление магнитной флокуляции используется при сгущении магнетитовых концентратов и при дешламации магнетитовых продуктов и концентратов. В первом случае флокуляция увеличивает скорость осаждения сильномагнитных частиц, во втором – дополнительно способствует удалению в слив тонких шламистых частиц, повышая содержание железа в песках.

Для образования флоккул пульпу перед сгущением намагничивают в специальных аппаратах или создают магнитное поле в обесшламливающих аппаратах – дешламаторах или гидроциклонах.

4. МАГНИТНЫЕ СЕПАРАТОРЫ

4.1. Классификация и обозначение магнитных сепараторов

Магнитное обогащение осуществляется в магнитных сепараторах, характерной особенностью которых является наличие в их

рабочей зоне магнитного поля, образуемого электромагнитной системой или системой из постоянных магнитов.

Магнитные сепараторы имеют следующие основные узлы.

1. Магнитная система. 2. Питатель для подачи материала (в сухих сепараторах он обычно бывает механическим). 3. Транспортирующее устройство для перемещения исходного продукта в зону разделения и удаления магнитных частиц (барабан, валок, ролик, конвейерная лента и др.). Таких устройств в одном сепараторе может быть несколько, соединенных последовательно для повышения производительности или параллельно для перечистки магнитного или немагнитного продуктов либо их обоих. 4. Короб с разделительными шиберами (при сухом обогащении) или ванна (при мокром обогащении) для сбора и разгрузки продуктов разделения. 5. Панель управления с пускорегулирующими и контрольно-измерительными устройствами.

По напряженности и силе магнитного поля H и $\text{grad}H$ сепараторы подразделяют на две группы: 1 - сепараторы со слабым магнитным полем; 2 - сепараторы с сильным магнитным полем. Эта классификация является основной и одновременно является классификацией по виду перерабатываемых продуктов. Первая группа аппаратов предназначена для обогащения сильномагнитных руд (H до 160 кА/м). Вторая группа аппаратов применяется для сепарации слабомагнитных руд (H до 1600 кА/м).

По типу среды, в которой осуществляется разделение, сепараторы подразделяют на аппараты для сухого и мокрого обогащения. Максимальная крупность частиц руды для сепараторов второй группы обычно не превышает 3 мм.

По способу подачи исходного сырья в рабочую зону сепараторы подразделяются на: сепараторы с верхней подачей исходного материала и сепараторы с нижней подачей. В первой группе аппаратов разделяемый продукт подается непосредственно на транспортирующее устройство (барабан, ролик, шкив и др.), которое впоследствии и удаляет из рабочей зоны только магнитный продукт. Во второй группе аппаратов разделяемый материал транспортируется в зону разделения одним устройством, а для извлечения магнитной фракции и выделения её в отдельный приемник применяется магнитная

система и транспортирующее устройство, расположенные над перемещающимся исходным материалом. Сепараторы с верхней подачей применяют преимущественно для крупного и зернистого материала, а с нижней подачей - для более мелкого. Для первой группы аппаратов характерно более высокое извлечение магнитных частиц при меньшем качестве магнитного продукта, по сравнению с аппаратами второй группы.

По направлению движения исходного продукта и продуктов разделения сепараторы с нижней подачей материала подразделяются на прямоточные, противоточные и полупротивоточные.

В прямоточных сепараторах исходный и немагнитный продукты движутся в одном направлении, а угол между траекториями движения магнитного и немагнитного продуктов менее 90^0 (рис. 4.1, а). В противоточных сепараторах исходный и немагнитный продукты движутся в одном направлении, а магнитный продукт – в противоположном. Угол между траекториями движения магнитного и немагнитного продуктов более 90^0 (рис. 4.1, б). В полупротивоточных сепараторах исходный продукт в виде пульпы подаётся снизу под давлением, а магнитный и немагнитный продукты движутся в разные стороны. Угол между траекториями движения магнитного и немагнитного продуктов равен 180^0 (рис. 4.1, в).

Прямоточный и противоточный режимы разделения могут быть осуществлены в мокрых и сухих магнитных сепараторах, полупротивоточный режим – только в мокрых.

По типу чередования полюсов открытой многополюсной системы сепараторы подразделяются на аппараты без магнитного перемешивания и аппараты с магнитным перемешиванием.

У аппаратов без магнитного перемешивания полюса чередуются по длине барабана. У аппаратов с магнитным перемешиванием полюса чередуются по периметру барабана (по ходу движения материала).

Для первой группы аппаратов характерно более высокое извлечение магнитных частиц при меньшем качестве магнитного продукта, по сравнению с аппаратами второй группы. С целью уменьшения загрязнения магнитного продукта немагнитными частицами применяют открытые магнитные системы с чередованием полюсов

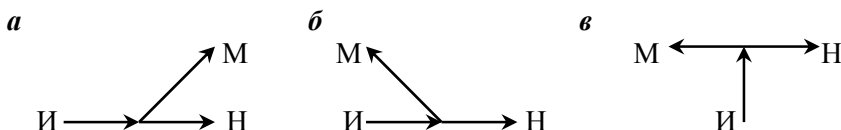


Рис. 4.1. Схемы движения продуктов в сепараторах с нижней подачей:
а – прямоточный сепаратор; *б* – противоточный; *в* – полупротивоточный.
 И – исходный; М – магнитный; Н – немагнитный

в направлении движения исходного продукта, что способствует разрушению флоккул и прядей.

По типу магнитной системы сепараторы подразделяются на аппараты с электромагнитной системой и аппараты с системой из постоянных магнитов. Первые аппараты потребляют дополнительную электроэнергию для питания электромагнитной системы и требуют пускорегулирующую аппаратуру, но позволяют получить более высокое значение магнитной силы. Сепараторы с магнитными системами из постоянных магнитов более надёжны в работе и дешевле в эксплуатации (отсутствует обмотка электромагнита).

По виду рабочей зоны разделения сепараторы подразделяются на аппараты с открытой и с замкнутой рабочей зоной и с зоной разделения, заполненной полиградиентной средой (ферромагнитными телами-носителями). К первым относятся сепараторы с открытыми многополюсными системами, ко вторым – сепараторы с замкнутыми системами, к третьим – высокоградиентные (полиградиентные) сепараторы. Первые характеризуются расположением рабочей зоны разделения с одной стороны от всех полюсов, вторые – расположением рабочей зоны между полюсами (см. рис. 2.2). Полиградиентные сепараторы характеризуются использованием для создания высокоградиентных полей специальных матриц, заполненных ферромагнитными носителями и помещаемых во внешнее магнитное поле.

Крупность разделяемого материала в аппаратах с открытой многополюсной системой практически не ограничена (ограничения имеются у конкретных типов аппаратов для обеспечения возможности транспортирования материала). В аппаратах с замкнутыми системами, где разделение происходит в межполюсном зазоре, крупность обогащаемого материала ограничена зазором, который

определяет магнитную силу (его величина обратно пропорционально влияет на извлекающую силу). Крупность обогащаемого материала полиградиентных сепараторов ещё ниже, так как она ограничена зазорами между ферромагнитными телами.

Полиградиентные сепараторы и сепараторы с замкнутыми магнитными системами позволяют получить более высокое значение магнитной силы, но имеют меньшую рабочую зону (по длине и высоте) и как следствие меньшую производительность.

По конструкции устройства для выделения магнитного продукта сепараторы подразделяются на барабанные, валковые, роликовые, дисковые, ленточные, шкивные, роторные и др.

Один сепаратор может иметь несколько рабочих устройств, например двухбарабанный сепаратор, восьмивалковый сепаратор.

Обозначение магнитных сепараторов

Магнитные сепараторы обозначаются основными тремя буквами и двумя цифрами.

Первая буква – тип магнитной системы: Э – электромагнитная система; П – система из постоянных магнитов.

Вторая буква – конструкция устройства для выделения магнитного продукта: Б – барабан; В – валок; Р – ротор (реже – ролик); Д – диск; Л – лента и др.

Третья буква – тип среды: С – сухой; М – мокрый.

Дополнительно может использоваться четвёртая буква: Ц – центробежный сепаратор; Ш – шариковый и др.

Две цифры в обозначении используются для барабанных и валковых сепараторов. Первая цифра – диаметр рабочего устройства, вторая – длина. Размеры рабочих устройств – в сантиметрах. После буквенного обозначения может стоять одна цифра, характеризующая модель аппарата.

Для сепараторов с несколькими рабочими устройствами перед буквами стоит цифра, указывающая количество этих устройств.

Мокрые барабанные сепараторы с нижней подачей дополнительно обозначаются через тире буквами, характеризующими направление движения продуктов (тип ванны): без буквы – прямой; П – противоточный; ПП – полупротивоточный; ППЦ – полупротивоточный с частичной циркуляцией магнитного продукта.

Примеры обозначения магнитных сепараторов

ЭБС-80/170 – электромагнитная система; барабанный сепаратор; сухой; диаметр барабана 80 см; длина барабана 170 см. 2ПБС-90/250 – система из постоянных магнитов; барабанный сепаратор; сухой; диаметр барабана 90 см; длина барабана 250 см; число барабанов – два. ПБМ-П-90/250 – система из постоянных магнитов; барабанный сепаратор; мокрый; диаметр барабана 90 см; длина барабана 250 см; противоточный. ПБМ-ППЦ-120/300 – система из постоянных магнитов; барабанный сепаратор; мокрый; диаметр барабана 120 см; длина барабана 300 см; полупротивоточный с частичной циркуляцией магнитного продукта. 4ЭВС-36/100 – электромагнитная система; валковый сепаратор; сухой; диаметр валка 36 см; длина валка 100 см; число валков – четыре. ЭБШМ-120/250 – электромагнитная система; барабанный шариковый сепаратор; мокрый; диаметр барабана 120 см; длина барабана 250 см. ПБСЦ-63/50 – система из постоянных магнитов; барабанный центробежный сепаратор; сухой; диаметр барабана 63 см; длина барабана 50 см.

Для магнитного обогащения полезных ископаемых предложено и разработано много типов сепараторов, отличающихся друг от друга как принципом работы, так и конструктивными особенностями. Предприятия, изготавливающие магнитные сепараторы и железоотделители, могут использовать свои обозначения, но, как правило, в обозначении имеется характеристика данного сепаратора.

4.2. Сепараторы со слабым магнитным полем для сухого и мокрого обогащения сильномагнитных руд и железоотделители

Сепараторы для сухого обогащения руд. К данной группе аппаратов относятся барабанные и шкивные сепараторы типа ПБС, ЭБС, шкивные сепараторы типа Ш.

Особенностью данного типа аппаратов является рабочий орган, выполненный в виде вращающегося барабана, внутри которого расположена неподвижная магнитная система в виде сектора (рис. 4.2). Полюса магнитной системы могут чередоваться как по длине барабана, так и по периметру. Магнитная система может быть как

электромагнитной, так и из постоянных магнитов, причём последняя находит всё большее применение. Способ подачи материала может быть любым, но чаще – верхний. Рабочая зона разделения открытая, поэтому крупность исходного материала для сепараторов с верхней подачей практически не ограничена (до 100 мм).

Исходный материал подаётся на барабан или на бесконечную ленту, охватывающую магнитный и натяжной барабан. В последнем случае сепаратор называется шкивным. Магнитная система у шкивного сепаратора может вращаться вместе с барабаном и располагаться по всему периметру последнего. В месте схода ленты с магнитного барабана осуществляется разгрузка магнитного продукта.

Основное применение сепараторов для сухого обогащения – предварительное обогащение крупнокусковой магнетитовой руды с целью вывода из процесса перед измельчением отвальных хвостов. Иногда с помощью сухой магнитной сепарации получают конечные концентраты. Кроме того, с помощью сухой магнитной сепарации можно осуществлять разделение руды на два типа с целью последующей раздельной их переработки.

Крупность исходной руды достигает 300 мм, но, как правило, менее 30 мм. Часто руду перед сепарацией делят на 2 класса с последующим раздельным магнитным обогащением. Большая крупность исходного продукта, даже при монослойной его подаче, позволяет получить высокие значения производительности.

Технические характеристики некоторых типов барабанных сепараторов приведены в табл. 4.1.

Напряжённость магнитного поля сепараторов в системе СИ измеряется в А/м (кА/м), но часто пользуются Эрстедами (Э). Для перевода кА/м в Э и обратно пользуются соотношением $1 \text{ А/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Э}$ или $1 \text{ А/м} \approx 1/80 \text{ Э}$. Например, $2000 \text{ Э} = 160000 \text{ А/м}$ ($2000 \cdot 80 = 160000$); $1360 \text{ кА/м} = 17000 \text{ Э}$ ($1360 \cdot 1000/80$).

Рассмотрим конструкцию и принцип работы барабанных сепараторов на примере аппаратов, приведённых на рис. 4.2.

Сепаратор ЭБС-80/170 (см. рис. 4.2, а) предназначен для сухого магнитного обогащения магнетитовых руд крупностью –15+0 мм. Магнитная система сепаратора электромагнитная с чередованием

Таблица 4.1

Технические характеристики сепараторов типа ПБС, ЭБС [3,4]

Параметры	ЭБС-90/100	ЭБС-80/170	ПБС-63/100 (ПБСЦ)	ПБС-90/200 (ПБСЦ)	4ПБС-63/200
Размер барабана, мм:					
- диаметр	900	800	630	900	600
- длина	1000	1700	1000	2000	2000
Число барабанов	1	1	1	1	4
Крупность обогащаемой руды, мм, не более	50	15			50
Производительность, т/ч	60	100			400
Напряжённость поля на поверхности барабанов, кА/м:					
- верхних	110-120	190	85	100	80-88
- нижних	-	-	-	-	110
Частота вращения барабанов, мин ⁻¹ :					
- верхних	25	34	54-300	-	49-102
- нижних	-	-	-	-	31-49
Мощность возбуждения поля, кВт	5,5	6,4	-	-	-
Номинальная мощность привода и питателя, кВт	1,1	3	5,5	-	7,6
Габаритные размеры, мм:					
- длина	2280	3090	1600	-	2710
- ширина	2440	2515	2400	-	2900
- высота	2795	2030	2000	-	2720
Масса, т	4,7	7,5	2	-	10

полярности полюсов по длине барабана. Способ подачи исходного материала нижний, направление движения исходного и магнитного продуктов – противоточное.

Исходный продукт из бункера 5 поступает на виброкаскадный питатель 3, выполненный в виде трёх ступенчато расположенных порогов. Это способствует увеличению длины рабочей зоны и постоянному подбрасыванию частиц к барабану, что, в конечном итоге, позволяет более полно извлекать магнитную фракцию. Магнитные частицы притягиваются к неподвижной магнитной системе 2 через вращающийся барабан 1 и транспортируются барабаном 1

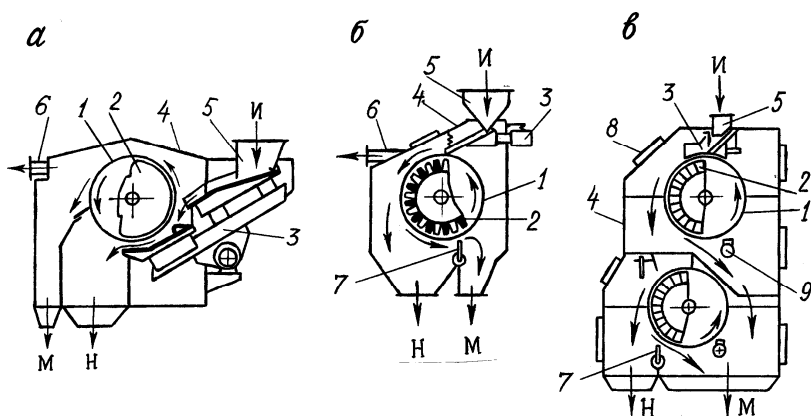


Рис. 4.2. Сепараторы для сухого обогащения сильномагнитных руд:
а – ЭБС-80/170: 1 – вращающийся барабан; 2 – неподвижная электромагнитная система; 3 – виброкаскадный питатель; 4 – корпус; 5 – бункер исходного продукта; 6 – аспирационный патрубок; *б* – ПБСЦ-63/50: 1 – вращающийся барабан; 2 – система из постоянных магнитов; 3 – вибропитатель; 4 – корпус; 5 – бункер исходного продукта; 6 – аспирационный патрубок; 7 – делитель (шибер); *в* – 2ПБС-90/250: 1 – вращающийся барабан (2 шт.); 2 – неподвижная система из постоянных магнитов; 3 – питатель; 4 – корпус; 5 – бункер исходного продукта; 6 – аспирационный патрубок; 7 – делитель (шибер); 8 – смотровой люк; 9 – очиститель барабана.
 и – исходный; м – магнитный; н – немагнитный

против хода движения исходного продукта. В дальнейшем магнитные частицы подымаются барабаном в верхнюю часть, где заканчивается магнитная система, и разгружаются, свободно падая с барабана в свой приёмник. Немагнитные частицы движутся по виброкаскадному питателю 3 до попадания в свой приёмник. Отсос пылевидных частиц осуществляется через аспирационный патрубок 6.

Сепараторы ПБС-63/50 и ПБСЦ-63/50 (см. рис. 4.1, б) предназначены для сухого магнитного обогащения мелкодроблённых сильномагнитных продуктов. Магнитная система сепаратора собрана из постоянных магнитов (никель-кобальтовый сплав) с чередованием полюсов по периметру барабана (по ходу движения материала). Способ подачи исходного материала – верхний.

Особенностью сепаратора является малый шаг полюсов – 55 мм - и повышенная скорость вращения барабана до 5 с^{-1} , что обеспечивает частоту магнитного поля 90 Гц. Большая частота магнитного

поля способствует интенсивному магнитному перемешиванию и как следствие получению богатых концентратов. Увеличение скорости вращения барабана позволяет доводить грубозернистые концентраты (крупнее 20 мкм) сухим способом до качества, соответствующего содержанию железа 60 % и более.

Сепаратор выпускается в двух исполнениях: ПБС с частотой вращения барабана $0,9-2,6 \text{ с}^{-1}$ и ПБСЦ (центробежный) с частотой вращения барабана $2,6-5 \text{ с}^{-1}$.

Сепаратор ПБС-63/50 работает следующим образом. Исходный продукт из бункера 5 поступает на вибропитатель 3, служащий для равномерной подачи исходного материала на барабан 1. Магнитные частицы притягиваются к неподвижной магнитной системе 2 через вращающийся барабан 1 и транспортируются последним до участка окончания магнитной системы 2, где магнитные частицы отрываются от барабана 1 и попадают в свой приёмник (см. рис. 4.2, б). Немагнитные частицы под действием гравитационной и центробежной сил отрываются от барабана раньше магнитных и попадают в свой приёмник. Для очистки барабана от пылевидных частиц в месте окончания магнитной системы устанавливаются очистительные устройства. Отсос пылевидных частиц осуществляется через аспирационный патрубок 6.

Для регулирования качества и количества продуктов разделения служит делитель или шибер 7. При повороте шиберов влево уменьшается выход немагнитного продукта, снижается содержание магнитных минералов (частиц) в немагнитном и магнитном продуктах. При повороте шиберов вправо (см. рис. 4.2, б) уменьшается выход магнитного продукта, повышается содержание магнитных минералов (частиц) в немагнитном и магнитном продуктах.

Аналогично сепаратору ПБС-63/50 работают другие однобарабанные сепараторы с верхней подачей материала типа ПБС, ЭБС и барабанные (шкивные) железоотделители, например ЭБС-90/100, ПБС(Ц)-63/100, ПБС(Ц)-63/200, ПБС(Ц)-90/200, Ш-65-63, БЭ-140/100.

Для повышения производительности сепаратора разработаны конструкции многобарабанных сепараторов 4ПБС-63/200 и 2ПБС-90/250. Первый сепаратор имеет два параллельно работающих верх-

них барабана и два параллельно работающих нижних барабана для пересортировки немагнитных продуктов верхних барабанов. У второго сепаратора один барабан сверху и один снизу. Барабаны сепараторов имеют магнитную систему из постоянных магнитов с чередованием полярности по ходу движения материала. Способ подачи исходного материала - верхний. Принципы работы сепараторов 4ПБС-63/200 и 2ПБС-90/250 аналогичны.

Сепаратор 2ПБС-90/250 работает следующим образом.

Исходный продукт из бункера 5 самотёком поступает на верхний вращающийся барабан 1. Магнитные частицы притягиваются к неподвижной магнитной системе 2 через вращающийся барабан 1 и транспортируются последним до места окончания магнитной системы 2, где магнитные частицы отрываются от барабана 1 и попадают в приёмник магнитного продукта (см. рис. 4.2, в). Немагнитные и слабомагнитные частицы под действием гравитационной и центробежной сил отрываются от верхнего барабана раньше магнитных и поступают на нижний барабан, где происходит их разделение на промпродукт (магнитный 2) и отвалы (немагнитный). Сепаратор позволяет получить три продукта: магнитный 1, магнитный 2 и немагнитный. Как правило, магнитный 1 и магнитный 2 продукты объединяют. Для регулирования качества и количества продуктов разделения нижнего барабана служит делитель или шибер 7. Для очистки барабанов от налипших на них мелких частиц служат очистители 9 периодического действия.

Магнитный продукт верхнего барабана более высокого качества по сравнению с магнитным продуктом нижнего барабана. Это достигается более высокой скоростью вращения верхнего барабана и меньшей напряжённостью поля его магнитной системы по сравнению с нижним барабаном.

Средние результаты сравнительных испытаний сепараторов 4ПБС-63/200 и 2ПБС-90/250 на дроблённой магнетитовой руде Соколовско-Сарбайского ГОКа (табл. 4.2) показали преимущество сепаратора 2ПБС-90/250 как технологического, так и эксплуатационного.

Известны конструкции трёхбарабанных сепараторов, например ЗЭБС-90/100. Этот сепаратор имеет два верхних барабана с пониженной напряжённостью поля, работающих на исходной руде. На

Таблица 4.2

Показатели обогащения дроблёной магнетитовой руды ССГОКа [3]

Показатель	4ПБС-63/200	2ПБС-90/250
Производительность, т/ч	230	510
Выход магнитного продукта, %	79,17	73,55
Массовая доля общего железа, %:		
• в питании	36,04	35,91
• в магнитном продукте	42,02	44,30
• в хвостах	13,31	12,58
Массовая доля магнитного железа в хвостах, %	4,27	3,54
Прирост массовой доли общего железа в магнитном продукте по сравнению с питанием, %	5,98	8,39
Извлечение общего железа в магнитный продукт, %	92,31	90,73

нижний барабан с более высокой напряжённостью поля поступают немагнитные продукты верхних барабанов.

Железоотделители. К этой группе аппаратов относятся железоотделители подвесные с ручной разгрузкой ферромагнитных тел и саморазгружающиеся и барабанные (шкивные).

Особенностью железоотделителей является высокий полюсный шаг, достигающий 0,6 м и более. Благодаря этому удаётся создать магнитные поля высокой напряжённости в больших рабочих объёмах (на значительном расстоянии от полюсов магнитной системы). Магнитная система, как правило, электромагнитная, состоящая из двух полюсов. Способ подачи исходного продукта может быть любым. Масса удаляемых ферромагнитных тел может достигать нескольких килограммов.

Железоотделители применяются:

- для переработки вторичных металлов, содержащих ферромагнитные металлы (шлаки, кабельный и радиоэлектронный лом, стружка чёрных и цветных металлов, смешанный лом, твёрдые бытовые отходы и др.);
- очистки немагнитных сыпучих материалов от магнитных примесей (концентраты неметаллических полезных ископаемых, отработанные формовочные пески литейного производства и др.)

- удаления случайных инородных ферромагнитных тел из транспортируемого материала с целью защиты технологического оборудования.

К сепараторам с нижней подачей исходного материала относятся подвесные железоотделители. Их подвешивают над конвейером, по которому транспортируется исходный материал. Можно выделить две основные группы подвесных железоотделителей: 1 – с ручной разгрузкой извлечённых ферромагнитных тел; 2- саморазгружающиеся ленточные.

К первой группе аппаратов относятся подвесные железоотделители типа П100 и П160, ЭЖ-60, ЭЖ-80, ЭЖ-100 (рис.4.3, *а*). Эти аппараты имеют двухполюсную магнитную систему, состоящую из магнитопровода 1, обмоток возбуждения 2 и полюсных наконечников 3. Исходный продукт транспортируется конвейером и проходит под полюсами железоотделителя, к которым из потока материала притягиваются ферромагнитные частицы. После определенного промежутка времени железоотделитель отводится в сторону, выключается ток, питающий электромагнит, и разгружается магнитный продукт в специальную емкость. Наиболее эффективным режимом работы является кратковременный, когда железоотделитель включается от сигнала металлоискателя. Железоотделители используются с конвейерами, имеющими ширину ленты 60-160 см (цифра в обозначении соответствует ширине ленты конвейера в сантиметрах). Аппараты такой конструкции следует применять при небольшой доле в исходном продукте ферромагнитных частиц (железа).

Большое распространение получили подвесные ленточные саморазгружающиеся железоотделители (рис. 4.3, *б*). К ним относятся ПС-120, ПС-160, ПС-200, ЭЖС- от 80 до 200 (цифра в обозначении аппарата соответствует ширине ленты конвейера в сантиметрах, буква С - саморазгружающийся). Они применяются для извлечения и удаления ферромагнитных предметов, находящихся в верхней части слоя материала, транспортируемого конвейером.

Подвесные саморазгружающиеся железоотделители состоят из транспортера, включающего ведущий 4 и ведомый 3 барабаны, вокруг которых перемещается транспортерная лента 2. Между внутренними поверхностями ленты максимально близко к нижней ее

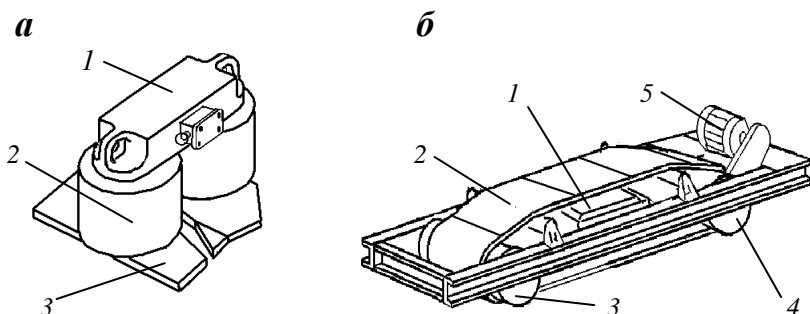


Рис. 4.3. Подвесные железоотделители:

а – с ручной разгрузкой магнитного продукта типа ЭЖ: 1 – магнитопровод; 2 – обмотки возбуждения; 3 – полюсные наконечники; *б* – саморазгружающийся типа ЭЖС: 1 – электромагнитная система; 2 – бесконечная лента; 3, 4 – ведомый и ведущий барабаны; 5 – электродвигатель

ветви (между ведущим и ведомым барабанами) расположена плоская магнитная система 1. Ферромагнитные тела притягиваются к магнитной системе и транспортируются лентой до участка окончания магнитной системы, после чего отрываются от ленты и падают в свой приемник. Магнитная система может быть электромагнитной (как у ПС и ЭЖС) или из постоянных магнитов (реже). Подвесные железоотделители с системой из постоянных магнитов более компактны, не требуют расхода электроэнергии для питания обмотки электромагнита, но обладают меньшими извлекающими способностями. Привод разгрузочной ленты у подвесных железоотделителей включается либо вручную по мере накопления ферромагнитных предметов, либо через равные промежутки времени, либо от импульса металлоискателя, установленного перед железоотделителем. Если в разделяемом продукте имеется большое количество ферромагнитных частиц, то привод разгрузочной ленты включен постоянно.

Подвесные ленточные железоотделители подвешиваются над лентой конвейера. Установка железоотделителя должна предусматривать регулировку высоты подвески над лентой конвейера. Для лучшего извлечения ферромагнитных предметов из транспортируемого материала рекомендуется, чтобы лента конвейера под железо-

отделителем была плоской, что достигается установкой прямых ро-ликоопор конвейера на некотором расстоянии до и после зоны дей-ствия магнитного поля железоотделителя. Для уменьшения сопро-тивления, создаваемого транспортируемым материалом ферромаг-нитным предметам, находящимся в нижнем слое этого материала, рекомендуется встряхивать участок конвейерной ленты, находя-щийся под железоотделителем специальными роликоопорами.

Подвесные ленточные железоотделители можно устанавливать над разгрузочным (ведущим) барабаном транспортирующего кон-вейера по направлению перемещения материала. Транспортируе-мый материал под железоотделителем по такой схеме установки находится в разрыхленном состоянии и оказывает минимальное со-противление при извлечении ферромагнитных предметов.

К другой большой группе сепараторов и железоотделителей относятся аппараты барабанного типа.

Сепараторы можно разделить на барабанные, у которых ис-ходный материал питателем подается на барабан, и на шкивные. Шкивной сепаратор представляет собой ведущий (реже – ведомый) барабан ленточного конвейера. Внутри барабана установлена маг-нитная система. Разделяемый материал у шкивного железоотделите-ля подается непосредственно на конвейерную ленту, у барабанного сепаратора – на барабан. Шкивные сепараторы, по сравнению с ба-рабанными, имеют несколько большие габаритные размеры, но более простую конструкцию, так как не требуют питателей. Прин-цип работы шкивных и барабанных железоотделителей аналогичен принципу работы барабанных магнитных сепараторов типа ПБС и ЭБС с верхней подачей материала.

К шкивным сепараторам относятся железоотделители типа ШЭ – от 50/63 до 100/140, ЭМШ – от 50/50 до 125/200, к барабанным – БЭ-120/100, БЭ-140/100. Эти аппараты имеют электромагнитную систему.

Магнитная система барабанных и шкивных сепараторов может быть электромагнитной и на постоянных магнитах (реже) с чередованием полюсов вдоль оси барабана перпендикулярно дви-жению материала и реже - по его окружности (по ходу движения материала). Например, у вышеперечисленных железоотделителей

применена секторная электромагнитная система с чередованием полярности вдоль оси барабана.

Барабанные и шкивные сепараторы имеют, как правило, верхнюю подачу исходного продукта. Однако в ряде случаев после определенной конструкторской доработки и поворота магнитной системы их можно устанавливать над конвейером исходного продукта.

В качестве приводного барабана шкивного сепаратора можно использовать барабан (ролик) с закрепленными на его поверхности постоянными магнитами по всей окружности и длине с различным чередованием полярности полюсов. Этот аппарат имеет очень простую конструкцию и может иметь небольшие габаритные размеры. Магнитная система вращается вместе с роликом, к ней притягиваются магнитные частицы и транспортируются лентой в зону разгрузки. Освобождение ленты от ферромагнитных частиц осуществляется на участке, где лента начинает двигаться прямолинейно и отделяться от поверхности приводного барабана шкива.

Сепараторы для мокрого обогащения руд. К этой группе аппаратов относятся барабанные и ленточные сепараторы типа ПБМ, ЭБМ, ЭЛ. Ленточные сепараторы в настоящее время практически не применяются. Способ подачи материала – нижний. По виду разделяемого продукта сепараторы можно разделить на аппараты для обогащения измельчённых магнетитовых руд и регенерации тяжело-средних магнетитовых суспензий.

Разделение осуществляется в водной среде, поэтому крупность исходного продукта, как правило, не превышает 3 мм. Барабанные сепараторы для обогащения руд имеют, как правило, магнитную систему из постоянных магнитов с чередованием полярности по периметру барабана (по ходу движения материала). Магнитная система сепараторов для регенерации тяжелосредних суспензий чаще электромагнитная секторная с чередованием полярности полюсов по длине барабана.

Удельная производительность (на 1 м длины барабана) сепараторов ПБМ при обогащении магнетитовых руд изменяется от 7-10 до 50 т/(ч*м) и более. Производительность снижается от первых к последним операциям мокрой магнитной сепарации технологической схемы. Удельная производительность (на 1 м длины барабана)

сепараторов ЭБМ при регенерации магнетитовой суспензии достигает $120 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м})$.

Технические характеристики некоторых типов барабанных сепараторов приведены в табл. 4.3.

Для регенерации магнетитовых тяжёлосредных суспензий применяются противоточные сепараторы ЭБМ-П-80/170 и ЭБМ-П-80/250. К регенерационным сепараторам предъявляются следующие требования: эффективная работа на весьма разбавленных пульпах при достаточной объёмной производительности; максимальное извлечение частиц утяжелителя (98 % и более); получение чистой и плотной магнитной фракции (более 2000 кг/м^3).

Сепаратор ЭБМ для регенерации суспензий по сравнению с сепараторами ПБМ для обогащения руд имеет следующие особенности: повышенную напряжённость магнитного поля (до 160 кА/м); большую длину рабочей зоны (сектор магнитной системы более 180° , барабан погружён в пульпу ниже своей оси); наличие отжимного скребка для обезвоживания магнитного продукта (около 85 % твёрдого).

Сепаратор ЭБМ-П работает следующим образом (рис. 4.4, з). Исходная тяжёлосредная суспензия по трубопроводу подаётся в распределительную коробку 1, откуда она попадает в ванну 4. По мере движения пульпы под вращающимся барабаном 2 из неё извлекаются частицы магнетита и притягиваются к неподвижной магнитной системе 3. Частицы магнетита поднимаются барабаном вверх, проходят под отжимным скребком 6 (обезвоживаются) и снимаются на противоположной стороне барабана счищающим скребком 7 и попадают в приёмник утяжелителя. Барабан вращается навстречу направлению движения исходного продукта.

Немагнитный продукт в ванне сепаратора делится на относительно крупный угольный шлам и слив. Первый разгружается в нижней части ванны и направляется на дальнейшую переработку, второй разгружается через порог ванны и направляется в качестве оборотной воды на отмывку суспензии из продуктов тяжёлосредной сепарации.

Барабанные сепараторы для обогащения руд ПБМ изготавливаются в трёх основных исполнениях: прямоточные, противоточные

Таблица 4.3

Технические характеристики сепараторов типа ПБМ, ЭБМ [3, 4]

Параметры	ЭБМ-П-80/250	ПБМ-90/250 (П, ПП, ПЦ, ППЦ)	ПБМ-120/300 (П, ПП, ПЦ, ППЦ)	ПБМ-150/400 (П, ПП, ПЦ, ППЦ)
Размер барабана, мм:				
- диаметр	800	900	1200	1500
- длина	2500	2500	3000	4000
Напряжённость поля на поверхности барабана, кА/м:	160	105-125	105-125	105-125
Номинальная мощность привода, кВт	4	5,5	7,5	-
Габаритные размеры, мм:				
- длина	3900	3100	4000	-
- ширина	2100	2000	2700	-
- высота	2300	2200	2700	-
Масса, т	7,5	4	7,4	-

и полупротивоточные. Кроме того, противоточные и полупротивоточные сепараторы могут быть с частичной циркуляцией магнитного продукта. Варианты сепараторов отличаются типом ванн и направлением движения продуктов (рис. 4.4, *а-в*).

Устройство и принцип действия сепараторов ПБМ практически одинаковы для всех вариантов. Они работают следующим образом (см. рис.4.4, *а-в*). Измельчённая руда в виде пульпы поступает из приёмной коробки 1 в ванну 4 под вращающийся барабан 2. Магнитные частицы извлекаются из пульпы, притягиваются к поверхности барабана и выносятся им до места окончания магнитной системы, где поле резко снижается. В этом месте магнитные частицы смываются с поверхности барабана водой, подаваемой из брызгал 5. Немагнитные частицы разгружаются либо через отверстие в нижней части ванны, либо через её переливной порог.

Внутри барабана неподвижно установлена магнитная система 3 из постоянных магнитов с чередованием полярности по ходу движения материала. Положение магнитной системы (угол её поворота) можно регулировать, оно различно для всех вариантов сепараторов. Приводное устройство находится внутри барабана. Обечайку бара-

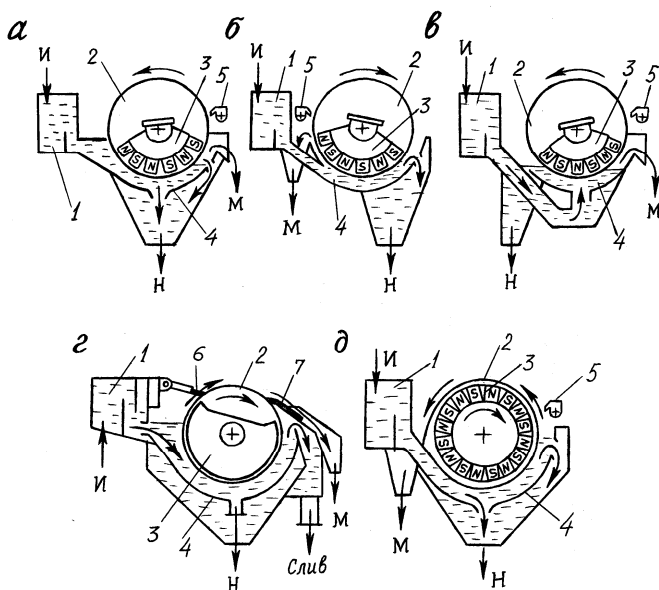


Рис. 4.4. Сепараторы для мокрого обогащения сильномагнитных руд:
а – прямоточный ПБМ; *б* – противоточный ПБМ-П; *в* – полупротивоточный ПБМ-ПП; *г* – противоточный ЭБМ-П для регенерации тяжелосредной суспензии; *д* – сепаратор с “бегущим” магнитным полем.
1 – приёмная коробка исходной пульпы; *2* – барабан; *3* – магнитная система; *4* – ванна; *5* – брызгала; *6, 7* – отжимной и очищающий скребки; *м* – магнитный; *н* – немагнитный

бана футеруют резиновой лентой. В боковых стенках ванны сепаратора имеются окна для её очистки от осевших шламов.

Прямоточные сепараторы применяются в первых операциях схем магнитного обогащения при крупности исходного продукта менее 3 мм (менее 25 % класса –71 мкм). Направление вращения барабана совпадает с направлением движения исходного, немагнитного и магнитного продуктов. Магнитный и тонкий немагнитный (перелив) продукты разгружаются с одной стороны барабана сепаратора. Грубозернистый немагнитный продукт разгружается через отверстие в нижней части ванны (см. рис.4.4, *а*).

Противоточные сепараторы также применяются в первых операциях схем магнитного обогащения при крупности исходного про-

дукта менее 1,5 мм. Барабан с извлечёнными магнитными частицами вращается навстречу движению исходного и немагнитного продуктов. Магнитный и немагнитный продукты разгружаются по разные стороны от барабана (см. рис. 4.4, б).

Полупротивоточные сепараторы применяются в последних операциях схем магнитного обогащения при крупности исходного продукта менее 0,5 мм (более 60 % класса –71 мкм). В полупротивоточных сепараторах исходный материал (пульпа) подаётся под давлением через отверстие в нижней части ванны под барабан. Немагнитный продукт движется против направления вращения барабана и самотёком разгружается через порог ванны. Магнитные частицы транспортируются барабаном и разгружаются с другой стороны ванны (см. рис. 4.4, в).

Разработаны конструкции прямоточных и полупротивоточных сепараторов с частичной циркуляцией магнитного продукта ПБМ-ПЦ и ПБМ-ППЦ. Особенностью этих аппаратов является то, что часть магнитного продукта отводится из приёмника концентрата и возвращается обратно в магнитный сепаратор. Сепараторы с частичной циркуляцией магнитного продукта позволяют получать несколько более богатые магнетитовые концентраты.

Для получения высококачественных магнетитовых концентратов разработаны сепараторы с переменным магнитным полем. Переменное или бегущее магнитное поле можно создать при помощи электромагнитной системы, питаемой переменным током, или механическим путём при относительном перемещении барабана (исходного продукта) и многополюсной магнитной системы. Частота бегущего поля в разработанных сепараторах составляет $40-200\text{ с}^{-1}$ и более. Сепарацию в бегущем магнитном поле осуществляют как в воздушной среде, так и в водной.

При попадании магнитной пряжи или флоккулы в переменное магнитное поле она разрушается, что позволяет выделить сrostки и мелкие немагнитные частицы, содержащиеся в магнитной пряже, в немагнитный продукт. В результате этого качество магнитного концентрата повышается по сравнению с традиционными барабанными сепараторами ПБМ.

На рис. 4.4, *д* приведён общий вид мокрого барабанного сепаратора с бегущим магнитным полем с нижней подачей материала. Сепаратор состоит из неподвижного барабана 2, внутри которого вращается с большой скоростью магнитная система 3 с чередованием полярности полюсов по образующей барабана. Скорость вращения магнитной системы 3 определяет частоту бегущего магнитного поля. Исходный материал из приёмной коробки 1 поступает в ванну 4. Магнитные частицы притягиваются к магнитной системе 3. Под действием бегущего магнитного поля пряжи и флоккулы разрушаются, из них высвобождаются немагнитные частицы и сrostки, которые разгружаются через отверстия в ванне 4. Далее магнитные частицы в виде “кипящего” слоя движутся в сторону, противоположную направлению вращения магнитной системы, и разгружаются в приёмник магнитного продукта (см. рис. 4.4, *д*). Для разгрузки магнитного продукта с поверхности барабана применяют конструкцию, позволяющую обеспечить постепенное удаление магнитной системы от поверхности барабана, или индукционные съёмники.

Сепараторы с бегущим магнитным полем позволяют получать магнетитовые концентраты с содержанием железа до 70 % и более за счёт разрушения прядей и флоккул. Однако широкого промышленного распространения сепараторы с бегущим магнитным полем не получили в связи с усложнением конструкции.

4.3. Сепараторы с сильным магнитным полем для сухого и мокрого обогащения слабомагнитных руд

К сепараторам с сильным магнитным полем для обогащения слабомагнитных руд и продуктов относятся валковые и высокоградиентные (полиградиентные) сепараторы и сепараторы различных конструкций с магнитными системами на постоянных магнитах на основе редкоземельных элементов ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, SmCo_5 и др.).

Валковые сепараторы для сухого и мокрого обогащения. К этой группе аппаратов относятся валковые сепараторы типа ЭВС и ЭВМ для сухого и мокрого обогащения. Валковые сепараторы с малым диаметром валка (менее 15 см) называются роликовыми. Известны конструкции дисковых сепараторов, которые по принципу

разделения также можно отнести к сепараторам рассматриваемой группы, но в настоящее время дисковые сепараторы практически не применяются в связи с низкой производительностью.

Особенностью валковых сепараторов является замкнутая рабочая зона разделения, ограниченная с одной стороны полюсными наконечниками, а с другой – вращающимся валком. Это ограничивает крупность разделяемых частиц (как правило, менее 5 мм) и длину рабочей зоны (трудность создания сильного поля в большом объеме) и как следствие снижает производительность валковых сепараторов, которая значительно меньше, чем у барабанных с открытой зоной разделения. Способ подачи исходного продукта может быть верхним или нижним.

Магнитная система валковых сепараторов замкнутая электромагнитная с замыканием магнитных силовых линий через индукционный валок. Валок сепаратора имеет выступы прямоугольного или треугольного сечения (см. рис. 2. 4, а, б), чем достигается повышение неоднородности и силы магнитного поля на выступе, по сравнению с противолежащим плоским или вогнутым полюсом. В результате этого слабомагнитные частицы притягиваются к выступам вала (на выступах максимальная магнитная сила) и выносятся валком в приёмник магнитной фракции.

Основное применение валковых сепараторов – обогащение слабомагнитных минералов и обезжелезивание неметаллических полезных ископаемых, керамического сырья и других продуктов. Обогащению подвергаются марганцевые и слабомагнитные железные руды, пески россыпных месторождений (извлечение ильменита, граната, ставролита, монацита и др.) и другие слабомагнитные руды и продукты.

Технические характеристики некоторых типов валковых сепараторов приведены в табл. 4.4.

Рассмотрим конструкцию и принцип действия валковых сепараторов на примере аппаратов, приведённых на рис. 4.5.

Сепаратор 2ЭВС-30/100 (см. рис. 4.5, а) предназначен для сухого обогащения слабомагнитных руд крупностью менее 50 мм. Магнитная система сепаратора 2, 3 имеет Х-образную форму и замыкается двумя валками 5. На центральную часть магнитопровода 3

Таблица 4.4

Технические характеристики валковых сепараторов [3]

Параметры	2ЭВС-30/100	8ЭВС-15/100	4ЭВМ-30/100	4ЭВМ-38/250
Размер вала, мм:				
- диаметр	300	160	300	380
- длина	1000	1000	1000	2500
Число валков	2	8	4	4
Максимальная напряжённость магнитного поля на выступе вала, кА/м	960	1400	1250	1350
Номинальная мощность приво- да, кВт	15	24	9	33
Габаритные раз- меры, мм:				
- длина	2380	3600	3000	5300
- ширина	1600	2500	2200	2900
- высота	1990	3500	2400	3000
Масса (без пуско- регулирующей аппаратуры), т	8,2	20	12	37,5

надеты обмотки возбуждения 2 (две – для среднемагнитных руд, десять – для слабомагнитных). Валок сепаратора (см. рис. 4.5, *з*) состоит из стального вала 1, на который попеременно надеты диски из магнитотомягкой стали 2 и немагнитного материала 3 (резины и др.). Магнитные силовые линии замыкаются перпендикулярно оси вала.

Сепаратор 2ЭВС-30/100 имеет верхнюю подачу материала. Исходный продукт делится в бункере 1 на два параллельных потока, которые поступают на вращающиеся валки 5 (рис. 4.5, *а*). Слабомагнитные частицы притягиваются к валку и транспортируются им в зону ослабления магнитного поля, где они отрываются от вала и попадают в свой приёмник. Немагнитные частицы под действием

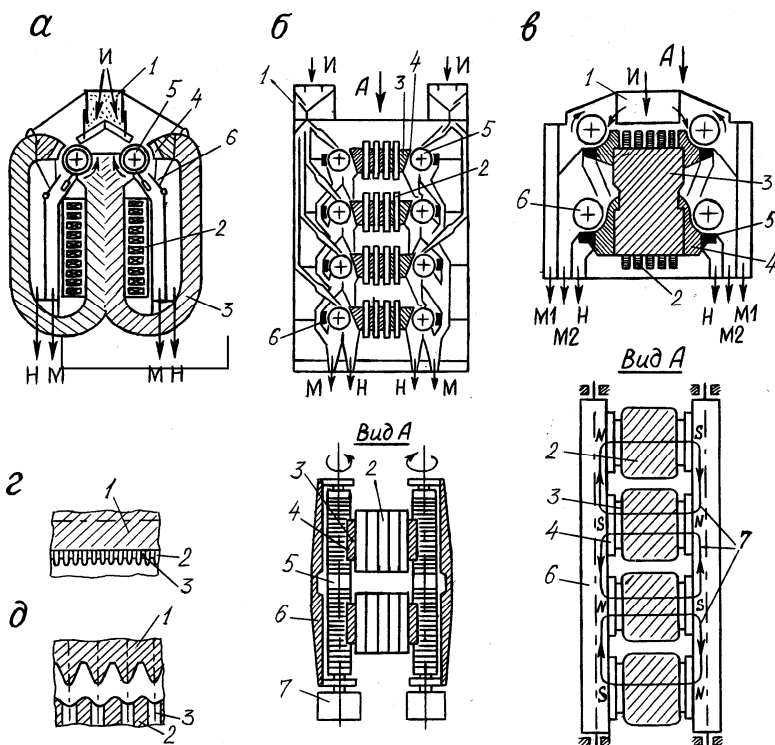


Рис. 4.5. Валковые сепараторы для обогащения слабомагнитных руд:
 а – 2ЭВС-30/100: 1 – бункер-питатель; 2 – катушка; 3 – сердечник; 4 – полюсный наконечник; 5 – валок; 6 – шибер; б – 8ЭВС-15/100: 1 – бункер-питатель; 2 – катушка; 3 – сердечник; 4 – полюсный наконечник; 5 – валок; 6 – дополнительный магнитопровод; 7 – привод; в – 4ЭВМ-38/275: 1 – бункер-питатель; 2 – катушка; 3 – сердечник; 4 – полюсный наконечник; 5 – часть полюсного наконечника со щелями; 6 – валок; 7 – замыкание магнитного потока; г – наборный валок с прямоугольным сечением выступов: 1 – стальной вал; 2 – диск из магнитомягкого материала; 3 – диск из немагнитного материала; д – сочетание вала с выступами треугольного сечения и полюсного наконечника с впадинами и щелями: 1 – валок; 2 – полюсный наконечник; 3 – щель для разгрузки немагнитного продукта

гравитационной и центробежной сил отрываются от вала раньше слабомагнитных частиц и попадают в свой приёмник.

Сепаратор 8ЭВС-15/100 с верхней подачей исходного продукта предназначен для сухого обогащения слабомагнитных руд крупностью менее 4 мм. Сепаратор имеет восемь рабочих валков (роли-

ков) с индивидуальным приводом. Магнитная система сепаратора состоит из магнитопроводов 3, катушек 2, полюсных наконечников 4 и дополнительных магнитопроводов 6 (см. рис. 4.5, б). Дополнительные магнитопроводы устанавливают со стороны нерабочего зазора с целью уменьшения магнитного сопротивления и предотвращения прогиба валков.

Принцип разделения на валке сепаратора аналогичен принципу разделения на сепараторе 2ЭВС-30/100. Особенностью сепаратора является наличие распределительных течек, позволяющих осуществлять две технологические схемы. На левой части сепаратора 8ЭВС-15/100 (см. рис. 4.5, б) изображена технологическая схема из одной операции разделения, когда исходный продукт делится на восемь частей и поступает на восемь валков. Это позволяет добиться большей производительности. На правой части сепаратора 8ЭВС-15/100 изображена технологическая схема из двух операций разделения, когда исходный продукт делится на четыре части и поступает на два верхних (первых) и два третьих валка. Немагнитные продукты двух первых валков поступают на два вторых валка, а немагнитные продукты двух третьих валков поступают на два четвёртых валка (нумерация валков – сверху вниз). Это позволяет обеспечить максимальное извлечение слабомагнитных минералов.

Сепаратор 4ЭВМ-38/275 с боковой подачей материала предназначен для мокрого обогащения узкоклассифицированного слабомагнитного материала крупностью $-4+1$ и $-1+0,1$ мм. Сепаратор имеет четыре рабочих валка 6 с выступами треугольного сечения. Магнитная система сепаратора состоит из магнитопроводов прямоугольного сечения 3 с надетыми на них обмотками возбуждения 2 и полюсных наконечников 4 с щелевидными отверстиями 5 в зоне разгрузки немагнитных продуктов. Магнитный поток замыкается по трём контурам 7 через четыре рабочих зазора для каждого валка (рис. 4.5, в).

Напряжённость магнитного поля сепаратора 4ЭВМ-275 на нижних валках достигает 1600 кА/м. На верхних валках напряжённость магнитного поля на 25 % меньше.

Рабочую зону сепаратора (зазор) образует валок сепаратора 1 с выступами треугольного сечения и полюсные наконечники 2 с впа-

динами, расположенными напротив выступов (зубцов) валька (рис. 4.5, д). Для разгрузки немагнитного продукта в полюсном наконечнике выполнены щелевидные отверстия 3 (см. рис. 4.5, д) с шириной 5 и 2 мм при обогащении материала крупностью $-4+1$ и $-1+0,1$ мм соответственно. Шаг и угол заострения зубцов свои для различной крупности материала (для более мелкого – меньше шаг и угол заострения).

Сепаратор работает следующим образом. Из питателя 1 предварительно обезвоженный материал по лоткам с канавками направляется на два верхних вращающихся валька 6 (см. рис. 4.5, в). Число канавок лотков соответствует числу зубцов вальков, а ось каждой канавки совпадает с осью соответствующего зубца валька. Слабомагнитные частицы притягиваются к выступам вращающихся вальков и выносятся ими за пределы действия магнитного поля, где происходит разгрузка слабомагнитных частиц в соответствующее отделение ванны сепаратора. Немагнитные частицы под действием силы тяжести и потока воды разгружаются через щели полюсных наконечников и поступают на нижние вальки на второй приём обогащения. Уровень пульпы в ваннах поддерживается постоянным с помощью переливных порогов. Сепаратор изготавливается в двух исполнениях: А и Б для мелкого и крупного материала, отличающихся вальками и полюсными наконечниками.

Высокоградиентные (полиградиентные) сепараторы. К этой группе сепараторов относятся аппараты с зоной разделения, заполненной ферромагнитными телами-носителями, замыкающими магнитный поток.

Основное применение высокоградиентных сепараторов – обогащение тонкоизмельчённых слабомагнитных руд, шламов и других продуктов (окисленные железные руды, обезжелезивание неметаллических полезных ископаемых).

Принцип разделения в высокоградиентном сепараторе заключается в следующем. При помещении матрицы, заполненной ферромагнитными телами, во внешнее магнитное поле ферромагнитные тела намагничиваются и создают высокое магнитное поле с трёхмерной неоднородностью с большим градиентом. Магнитная сила внутри объёма ферромагнитных тел хотя и ограничена, но больше,

чем в любом другом сопоставимом сепараторе. Когда рабочая матрица сепаратора находится в зоне действия внешнего магнитного поля, в объём ферромагнитных тел подаётся пульпа исходного материала. Слабомагнитные частицы притягиваются к поверхности ферромагнитных тел. Немагнитные частицы проходят между ферромагнитными телами и разгружаются под действием силы тяжести (если использована верхняя подача материала). Далее рабочая матрица выводится из зоны действия магнитного поля, ферромагнитные тела размагничиваются, и слабомагнитная фракция смывается водой и попадает в свой приёмник.

Матрицы высокоградиентных сепараторов делятся на три группы: контактные, бесконтактные и комбинированные.

К контактным относятся матрицы, у которых ферромагнитные тела (шары, цилиндры) соприкасаются друг с другом. К бесконтактным относятся матрицы, у которых феррозакрепители (рифлённые пластины, стержни различного сечения) закреплены с зазорами друг относительно друга. Комбинированные матрицы заполняются ферромагнитными телами (сетка, стружка, вата), уложенными без зазоров между собой. В данном случае матрица является как контактной (в зоне соприкосновения её элементов), так и бесконтактной (в остальных зонах). Феррозакрепители матриц изготавливаются из магнитомягких материалов с высокой магнитной проницаемостью, низкой остаточной индукцией и высокой абразивной и коррозионной стойкостью.

Рассмотрим конструкцию и принцип работы высокоградиентных сепараторов на примере аппаратов, приведённых на рис. 4.6.

Наиболее простую конструкцию имеют барабанные шариковые сепараторы с неподвижной магнитной системой, расположенной внутри вращающегося барабана. В качестве ферромагнитной среды используются шарики, слоём уложенные на поверхности барабана. Для удержания шариков у поверхности барабана в нижней его части используют обечайку с отверстиями для разгрузки продуктов. Напряжённость магнитного поля таких сепараторов достигает 320-480 кА/м.

Барабанный шариковый сепаратор ЭБМШ-120/250 разработан для обогащения окисленных железных руд и шламов на фабриках

невысокой производительности. Производительность сепаратора составляет 10-40 т/ч в зависимости от крупности и магнитных свойств исходного продукта.

На поверхность барабана сепаратора ЭБМШ-120/250 уложены металлические окатыши (ферромагнитные тела), которые намагничиваются под действием магнитной системы. Окатыши постоянно перекатываются и движутся в одном направлении с барабаном. В левой части сепаратора (рис. 4.6, *а*) окатыши удерживаются у поверхности барабана за счет силы магнитной системы. В правой части сепаратора окатыши размагничиваются и падают вниз под действием силы тяжести, где они подхватываются магнитным полем и попадают опять в левую часть сепаратора. Сепаратор снабжён устройством автоматического извлечения комплекта ферромагнитных носителей со дна ванны при включении электромагнитной системы и укладкой их на дно ванны при выключении системы.

Сепаратор ЭБМШ-120/250 (см. рис. 4.6, *а*) работает следующим образом. Пульпа исходного материала из питателя 3 поступает на вращающийся барабан 1 напротив неподвижной электромагнитной системы 2, установленной внутри барабана. Немагнитные частицы под действием гравитационных сил проходят сквозь слой окатышей и разгружаются в левой части сепаратора. Слабомагнитные частицы притягиваются к намагниченным окатышам и движутся в верхнюю часть барабана и, далее, в правую часть барабана, где окатыши размагничиваются и слабомагнитные частицы смываются с их поверхности водой. Для лучшей очистки окатышей от слабомагнитных частиц и лучшего их размагничивания правая часть сепаратора снабжена неподвижными немагнитными полками, по которым скатываются окатыши вниз.

Более сложную конструкцию и большие массу и размеры по сравнению с барабанными сепараторами имеют высокоградиентные сепараторы с перфорированным ротором (роторами). Рабочим элементом данных аппаратов является вращающийся ротор, разделённый на рабочие камеры (матрицы), заполненные ферромагнитными телами. Рабочая камера таких сепараторов поочередно входит в зону

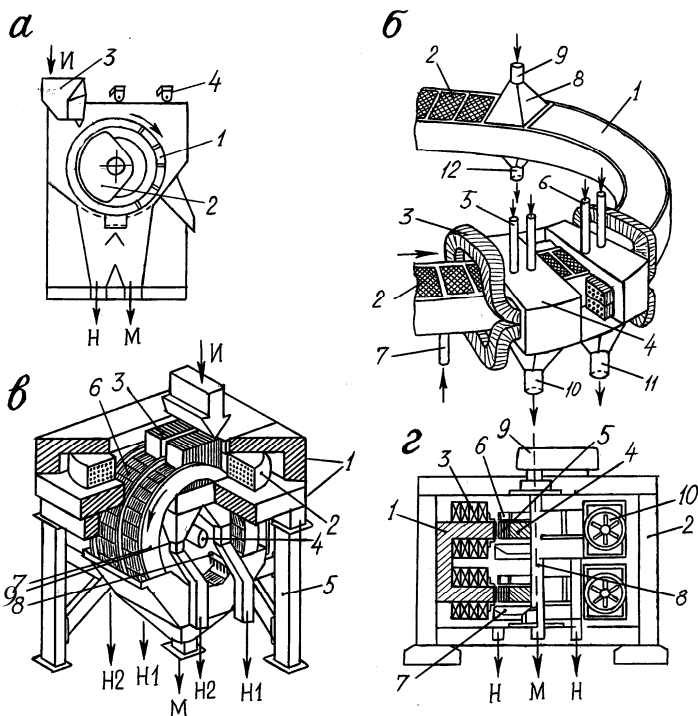


Рис. 4.6. Высокоградиентные магнитные сепараторы:

а – ЭБМШ-120/250: 1 – барабан; 2 – электромагнитная система; 3 – питатель; 4 – брызгала; *б* – Сала-Карусель: 1 – ротор; 2 – рабочие камеры (матрицы); 3 – обмотки возбуждения; 4 – магнитопровод; 5 – патрубки для подачи исходной пульпы; 6 – патрубки для подачи промывной воды; 7 – патрубок для предварительного заполнения рабочей камеры водой; 8 – станция разгрузки магнитного продукта; 9 – патрубок для подачи смывной воды; 10, 11 – патрубки для разгрузки немагнитных продуктов; 12 – патрубок для разгрузки магнитного продукта; *в* – ВГС-100/2 (схематическое устройство): 1 – магнитопровод; 2 – обмотка возбуждения; 3 – верхние полюса магнитной системы с отверстиями для подачи исходного продукта; 4 – вал; 5 – рама; 6 – рабочая матрица с феррозатворителем; 7 – перфорированный ротор; 8 – смывное устройство магнитного продукта; 9 – ванна; *г* – сепаратор Джонса: 1 – магнитопровод; 2 – рама; 3 – обмотки возбуждения; 4 – ротор; 5 – рабочие камеры с феррозатворителем; 6 – приёмники для подачи исходной пульпы и воды; 7 – ванна для сбора продуктов обогащения; 8 – вал; 9 – привод; 10 – вентилятор для охлаждения обмоток возбуждения

действия магнитного поля (зона загрузки исходного и разгрузки немагнитного продуктов) и в зону разгрузки магнитного продукта (внешнее магнитное поле отсутствует). Магнитная система роторных высокоградиентных сепараторов располагается снаружи и позволяет создавать более высокие значения магнитной силы.

Роторные высокоградиентные сепараторы по направлению вектора магнитной индукции подразделяются на две группы: с горизонтальным и вертикальным направлением. При несовпадении вектора индукции с направлением подачи питания (исходный подаётся сверху, горизонтальный вектор магнитной индукции) возрастает вероятность зарастания рабочих зазоров между ферромагнитными телами матриц. При совпадении вектора индукции и подачи питания (вертикальный вектор) уменьшается вероятность перекрытия рабочих зазоров магнитными частицами.

Для создания горизонтального магнитного поля используются более простые электромагнитные системы с боковым расположением полюсов относительно рабочих матриц. Однако для достижения требуемых объёмов зоны разделения необходимо значительно увеличивать размеры и массу электромагнита и самого сепаратора. К аппаратам этой группы относится сепаратор Джонса фирмы «Humboldt Wedag» (Германия) (рис. 4.6, з).

Для создания вертикального вектора магнитной индукции используются электромагнитные системы панцирного типа, один полюс которых располагается над вращающимся ротором, а другой – под ротором. Такое взаиморасположение полюсов создаёт более сильное и равномерное магнитное поле внутри объёма рабочей матрицы и обеспечивает большую единичную производительность сепаратора по сравнению с сепараторами с горизонтальным магнитным потоком. К группе аппаратов с вертикальным вектором магнитной индукции относятся сепараторы «Sala-Carousels» фирмы «Denver Sala» и ВГС-100/2 (рис. 4.6, б и в).

Высокоградиентные сепараторы «Sala-Carousels» фирмы «Denver Sala» имеют кольцеобразный рабочий орган (ротоп) 1, разделённый на рабочие камеры 2, в качестве матриц которых использованы сетки (см. рис. 4.6, б). Рабочие камеры ротора проходят через замкнутую магнитную систему, создающую магнитный поток в

вертикальном направлении. Магнитная система состоит из водоохлаждаемых медных обмоток 3 и магнитопровода 4 и расположена таким образом, что один полюс находится над ротором, а другой – под ротором. Исходная пульпа и промывная вода подаются в рабочую зону сверху по патрубкам 5 и 6 соответственно, а затем через щелевидные отверстия в верхнем полюсе магнитной системы. Через щелевидные отверстия в нижнем полюсе, а затем по патрубкам 10 и 11 разгружается немагнитная фракция. Перед загрузкой исходного продукта рабочая камера предварительно заполняется водой по патрубку 7. В процессе вращения ротора его текущая рабочая камера заходит в станцию разгрузки магнитного продукта 8. Станция разгрузки магнитного продукта имеет два варианта исполнения. При первом варианте смывная вода подаётся по патрубку 9 сверху, при втором – вода подводится снизу под давлением, а магнитный продукт разгружается с помощью сифона.

Охлаждение обмоток электромагнитной системы осуществляется водой. Расход воды составляет 0,15 л/мин на 2 кВт номинальной мощности. Контур охлаждения катушек сепаратора имеет автоматическую систему защиты от перегрева.

Фирма «Denver Sala» (США) разработала несколько моделей сепараторов «Sala-Carousels», отличающихся числом и мощностью электромагнитных систем (магнитных головок), размерами и как следствие производительностью (табл. 4.5).

Пражским институтом по исследованию руд и институтом «Механобрчермет» разработан двухбарабанный сепаратор ВГС-100/2 производительностью 100 т/ч (см. рис. 4.6, в). Сепаратор ВГС-100/2 имеет два ротора (барабана) диаметром 2000 мм и шириной 1000 мм. Масса сепаратора 143,5 т, габаритные размеры 5140х5960х3320 мм, мощность привода роторов 10,8 кВт, мощность электромагнитной системы при напряжённости 400 кА/м составляет 22,4 кВт (максимальная мощность – 84 кВт). Сепаратор имеет панцирную магнитную систему, создающую магнитный поток в вертикальном направлении. Сепаратор ВГС-100/2 в отличие от сепаратора «Sala-Carousels» имеет горизонтальную ось вращения роторов.

Панцирная магнитная система сепаратора ВГС-100/2 (см. рис. 4.6, в) состоит из магнитопровода 1 с расположенной внутри обмот-

Таблица 4.5

Технические характеристики сепараторов «Sala-Carousels»

Мо- дель	Размеры, $L \times B \times H$, мм	Число магнит- ных го- ловок	Напря- жён- ность, кА/м	Мощность возбужде- ния маг- нитного поля, кВт	Масса без маг- нитной системы, т	Масса магнит- ной си- стемы, т	Произ- водитель- ность*, т/час
120	2500х х2200х х2880	2	400 560 800 1200	25 40 75 175	6	2 3 3 5	6
185	4100х х3700х х3600	2	400 560 800 1200	35 65 85 200	10	6 9 18 31	35
240	4700х х4500х х3600	2	400 560 800 1200	45 75 100 220	20	12 17 34 58	75
350	7000х х7000х х3700	3	400 560 800 1200	70 120 150 320	40	26 39 73 127	150

* Производительность приведена для одной магнитной головки при обогащении гематитовой руды.

кой прямоугольного сечения 2 и полюсов 3 с отверстиями для подачи питания и промывной воды в рабочую матрицу ротора (верхние полюса) и разгрузки немагнитной фракции (нижние полюса). Часть магнитопровода, находящаяся внутри катушки, имеет кольцеобразный канал для прохождения в нём роторов 7, разделённых на рабочие камеры с матрицами 6. На внешней части магнитопровода установлены приёмники для продуктов разделения. Подача исходного продукта и разгрузка немагнитного продукта осуществляются в матрицах, находящихся в верхней части роторов (ротор находится внутри магнитной системы). Разгрузка магнитного продукта осуществляется из матриц, находящихся в нижней части роторов (ротор нахо-

дится в ванне 9). В качестве феррозаполнителя матриц используются стержни.

При обогащении окисленных железистых кварцитов (в две операции) в сепараторе ВГС-100/2 получены следующие показатели: выход концентрата 40,5 %; массовая доля железа в концентрате 59,3 %; извлечение железа в концентрат 68,1 %. Производительность по питанию составила 100 т/ч, массовая доля железа в исходном продукте 35,3 %, напряжённость магнитного поля 640 кА/м.

Сепараторы Джонса (Германия) имеют магнитную систему, создающую горизонтальный магнитный поток. Сепаратор Джонса (см. рис. 4.6, з) состоит из электромагнитной системы, двух роторов 4 с рабочими камерами 5, заполненными рифлёными пластинами, приёмников 6 для подачи исходной пульпы в рабочую камеру ротора, устройства для промывки и смыва концентрата, вала роторов 8 с приводом 9 и ванн 7 для сбора продуктов обогащения. Электромагнитная система состоит из магнитопровода 1 и четырёх медных катушек 3, охлаждаемых потоком воздуха. Сепаратор имеет специальное очистное устройство для очистки рабочих зазоров между пластинами от сильномагнитных частиц. Очистное устройство установлено над рабочей матрицей вне зоны действия магнитного поля и обеспечивает периодическую подачу сжатого воздуха и воды, управляемую электронной системой.

Каждый ротор имеет по две точки подачи исходного продукта и разгрузки немагнитного (в зоне действия внешнего магнитного поля) и по две точки разгрузки магнитного продукта (вне зоны действия магнитного поля).

В качестве феррозаполнителя рабочих камер роторов применены пластины с шагом нарифлений 3,2 мм. Пластины установлены вертикально с зазором 0,8-2,5 мм. Максимальная напряжённость магнитного поля составляет 880 кА/м, она одинакова для верхнего и нижнего роторов. Мощность возбуждения магнитного поля сепаратора ДР-317 достигает 75 кВт.

Фирма «Humboldt Wedag» (Германия) разработала типоразмерный ряд сепараторов Джонса с диаметром роторов от 400 до 3350 мм, отличающихся габаритными размерами и производительностью (табл. 4.6).

Таблица 4.6

Технические характеристики высокоградиентных сепараторов Джонса

Параметры	ДР-335	ДР-317	ДР-250	ДР-180	ДР-140	ДР-112	ДР-90
Диаметр ротора, см	335	317	250	180	140	112	90
Производительность, т/ч*	240	120	75	40	25	15	10
Габаритные размеры, мм:							
- длина	-	6300	5500	5450	3940	3500	3040
- ширина	-	4005	3475	2875	2480	2280	2080
- высота	-	4250	4100	3850	3600	3400	3150
Масса, т	-	98,0	70,0	41,7	23,0	22,4	16,0

* Данные о производительности (кроме ДР-335) приведены по результатам обогащения бразильской итабиритовой руды крупностью $-1+0$ мм при массовой доле твёрдого в пульпе 45-50 %. Для сепаратора ДР-335 приведены данные для руды месторождения Лас-Трухас (Мексика) при зазорах между пластинами 5 мм.

Достоинством сепаратора Джонса является высокая механическая надёжность и простота конструкции. К недостаткам сепаратора следует отнести забивание (зарастание) рабочих зазоров между пластинами сильномагнитными частицами или случайными крупными предметами, что приводит к затруднению протекания пульпы через матрицы ротора.

Общим достоинством всех высокоградиентных сепараторов является создание в зоне разделения высокой магнитной силы, позволяющей обогащать тонкоизмельчённые слабомагнитные минералы и другие продукты.

К недостаткам всех конструкций высокоградиентных сепараторов с перфорированным ротором (роторами) относятся высокие расходы электроэнергии и воды при обогащении и резкое возрастание массы, размеров и стоимости при использовании сепаратора с высокой производительностью. Так, удельный расход электроэнергии на 1 т руды достигает: 0,5 кВт (сепаратор Джонса); 2,4 кВт («Sala-Carousels»); 3,45 («Крупп-Сол»), а удельный расход воды на 1 т руды достигает: 1,5-2,0 м³ (сепаратор Джонса); 24 м³ («Sala-Carousels»).

Кроме того, эффективность разделения в высокоградиентных сепараторах снижается при закреплении слабомагнитных частиц на поверхности ферромагнитных тел более чем в один слой. В связи с

этим сепараторы достигают высоких результатов разделения при производительности ниже паспортной.

Сепараторы с системами на основе редкоземельных постоянных магнитов. К этим аппаратам относится большая группа сепараторов различных конструкций, особенностью которых является использование постоянных магнитов из редкоземельных сплавов для создания высоких магнитных полей.

Для изготовления постоянных магнитов используются следующие соединения: $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, реже SmCo_5 или $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. К недостаткам первых следует отнести восприимчивость к коррозии, к недостаткам вторых – более высокую стоимость. Магнитные системы сепараторов из редкоземельных постоянных магнитов позволяют создавать магнитные поля с напряжённостью от 240-320 (сепараторы типа ПБС) до 1600 кА/м (индукция сепараторов фирм «Raoul Lenoir» и «Eriez» достигает 2 Тл).

Основное применение этих сепараторов – обогащение слабомагнитных руд и обезжелезивание неметаллических полезных ископаемых и другого сырья. Известно применение сепараторов на постоянных редкоземельных магнитах для обогащения марганцевых и железных окисленных руд, для доводки коллективных концентратов россыпных месторождений (извлечение ильменита, граната, ставролита) и для очистки кварцевого, полевошпатового, стекольного сырья, талька, керамики, цемента и др. видов сырья.

По сравнению с валковыми сепараторами с электромагнитными замкнутыми системами, аппараты с системой из редкоземельных магнитов имеют следующие преимущества: 1) компактность, небольшая масса и малый расход электроэнергии (нет электромагнитной системы); 2) возможность создания сильного магнитного поля в открытой рабочей зоне разделения.

Последнее преимущество относится к аппаратам с открытыми магнитными системами и позволяет достичь производительности, сопоставимой с сепараторами типа ПБС, и поднять верхний предел крупности обогащаемого материала (отсутствие рабочего межполюсного зазора).

К недостаткам сепараторов с системой из редкоземельных магнитов можно отнести относительно высокую стоимость магнит-

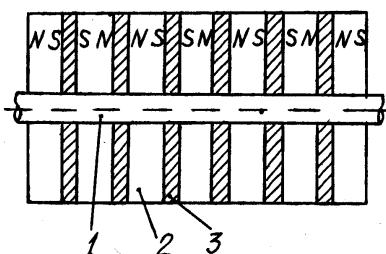
ной системы (хотя и сопоставимую со стоимостью электромагнитных систем). Кроме того, магнитные системы из редкоземельных магнитов создают высокие поля у поверхности полюсов, а при удалении от полюса магнитное поле резко снижается, что затрудняет создавать сильные поля в сепараторах с нижней подачей материала, особенно – у мокрых сепараторов. Другой недостаток сепараторов проявляется при случайном попадании сильномагнитных частиц в зону разделения, так как тогда возникают большие трудности с разгрузкой магнитного продукта. Последнего недостатка лишены сепараторы с электромагнитными системами, позволяющие снизить напряжённость поля до нуля при отключении электрического тока.

В настоящее время разработаны многие конструкции магнитных сепараторов с постоянными редкоземельными магнитами: барабанные с внутренней неподвижной и с наружной вращающейся магнитной системой; индукционные валковые с замкнутой магнитной системой; магнитогидростатические и др.

За рубежом наибольшее распространение получили сухие сепараторы с вращающимся магнитным валом (с открытой магнитной системой). Принцип действия этих аппаратов аналогичен сепараторам с верхней подачей исходного продукта типа ПБС. Для разгрузки магнитного продукта, притянувшегося к валку (барабану), используется либо щетка, либо бесконечная лента, огибающая магнитный и натяжной валки.

Основным и наиболее дорогостоящим элементом сепаратора является магнитный валок, состоящий из вала 1, тороидообразных магнитов 2 и шайб 3 из магнитомягкого материала (рис. 4.7, *а*). Соседние магнитные диски устанавливаются таким образом, чтобы они были обращены друг к другу одной полярностью. Такая конструкция магнитного вала, а также правильные соотношения толщины тороидообразных магнитов и шайб позволяют создавать высокие магнитные поля с индукцией до 2 Тл. Зависимость индукции магнитного поля от расстояния до поверхности магнитного вала в зоне наивысшего градиента сепараторов фирмы «Raoul Lenoir» приведена на рис. 4.7, *б* [8]. Различные зависимости характеризуют свойства и качество изготовления постоянных магнитов.

a



б

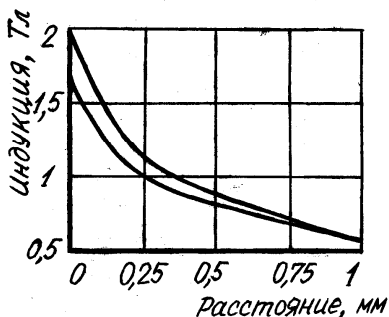


Рис. 4.7. Схема магнитного вала (*a*) и зависимость индукции магнитного поля от расстояния до поверхности магнитного вала (*б*):

1 – вал; 2 – тороидообразный магнит; 3 – магнитомягкая шайба

Анализируя зависимости, приведённые на рис. 4.7, *б*, можно отметить следующее. Магнитная система хотя и обеспечивает высокое магнитное поле, но поле это неглубокое и резко снижается при удалении от поверхности системы. Так, при удалении от поверхности магнитной системы всего на 0,5 мм индукция магнитного поля снижается более чем в два раза. Поэтому все фирмы-производители стремятся максимально приблизить разделяемый материал к поверхности магнитного вала: 1) путём применения верхней подачи исходного продукта; 2) снижения толщины бесконечной ленты для разгрузки магнитного продукта (у сепаратора «Pemroll» фирмы «Ore sorters international» используется кевларовая лента толщиной 0,15 мм); 3) применения щётки для разгрузки магнитного продукта с вала (отказ от бесконечной ленты).

Сепараторы с магнитными валами из редкоземельных магнитов изготавливаются фирмами «Ore sorters international» (Pemroll), «Boxmag Rapid» (Magnaroll), «Eriez» (Roll), «Raoul Lenoir» (Rollmag) «Механобр» (ПВС-28/10) и др.

В табл. 4.7 приведены характеристики некоторых сепараторов Roll фирмы «Eriez». Сепараторы отличаются диаметром (75, 100 и 300 мм) и длиной валков (различная производительность). Фирма указывает максимальную индукцию магнитного поля 2,1 Тл (1680 кА/м), крупность перерабатываемого сырья –13+0,075 мм. Фирма

Таблица 4.7

Технические характеристики сепараторов Roll фирмы «Eriez» (США)

Модель	Диаметр валка, мм	Ширина питания, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм
RE75-10	75	250	1100	875	750
RE75-30		760		1700	
RE75-60		1500		3400	
RE100-10	100	250	1100	875	750
RE100-30		760		1700	
RE100-60		1500		3400	
RE300-10	300	250	1450	875	1100
RE300-30		760		1700	
RE300-60		1500		3400	

«Eriez» разрабатывает сепаратор для обогащения более мелкого сырья сухим способом (применение встряхивания и перемешивания).

Валковые сепараторы komponуются в схему с последовательным выделением магнитных или немагнитных продуктов. Обязательна предварительная сепарация в слабом магнитном поле для удаления сильномагнитных частиц.

Сепараторы со сверхпроводящими магнитными системами

В настоящее время разработаны конструкции электромагнитных сверхпроводящих систем, создающих магнитное поле с индукцией порядка 3-5 Тл и более. Особенностью сверхпроводящих магнитных систем является использование в качестве проводников тока сверхпроводников из Nb-Sn, Nb-Ti или других соединений. При охлаждении сверхпроводящего соленоида жидким гелием ($T=4\text{ K}$) возникает явление сверхпроводимости, позволяющее пропускать высокий ток через проводник без сопротивления и благодаря этому создавать магнитное поле высокой интенсивности.

Сверхпроводящие магнитные системы имеют меньшие размеры и массу по сравнению с традиционными электромагнитными системами. Однако сверхпроводящие магнитные сепараторы дополнительно требуют криогенную установку для сжижения гелия и систему рекуперации испаряющегося гелия.

В России и за рубежом разработаны конструкции сверхпроводящих магнитных сепараторов и проведены испытания, показавшие возможность их применения для обогащения слабомagnetных минералов и других продуктов. Разработка промышленных сепараторов со сверхпроводящими магнитными системами позволит расширить область использования магнитного метода обогащения и вовлечь в переработку труднообогащаемое тонкоизмельчённое сырьё с весьма низкими магнитными свойствами.

4.4. Вспомогательное оборудование

К вспомогательному оборудованию при магнитном обогащении относятся магнитные дешламаторы и гидроциклоны и аппараты для намагничивания и размагничивания пульп.

Магнитные дешламаторы. Дешламаторы применяют на обогатительных фабриках для сброса в хвосты шламов пустой породы и бедных сростков из сливов классифицирующих аппаратов и для сгущения магнетитовых концентратов перед фильтрованием.

Магнитный дешламатор (рис. 4.8, а) представляет собой сгуститель с центральным приводом, состоящий из чана цилиндрической формы 1, гребковой рамы 2, закреплённой на валу 3, кольцевого сливного желоба 4 и трубы для подачи исходной пульпы 5. Особенностью дешламаторов является наличие намагничивающего устройства для исходной пульпы 6. Некоторые дешламаторы имеют дополнительные намагничивающие устройства 7, закреплённые на вращающейся гребковой раме.

При прохождении пульпы через магнитное поле ($H=32-40$ кА/м) намагничивающих устройств частицы магнетита образуют флоккулы и осаждаются на дно дешламатора. Сгущённый продукт удаляется насосами. Вращающиеся гребки способствуют получению более плотного сгущённого продукта и взмучиванию оседающего шлама. Осветлённая вода вместе со шламами переливается через кромки кольцевого сливного желоба и отводится из дешламатора.

При дешламации обеспечивается прирост массовой доли железа в сгущённом продукте по сравнению с исходным продуктом от 0,3 до 10 %. Выход слива (шламов) составляет 0,1-24 % с массовой

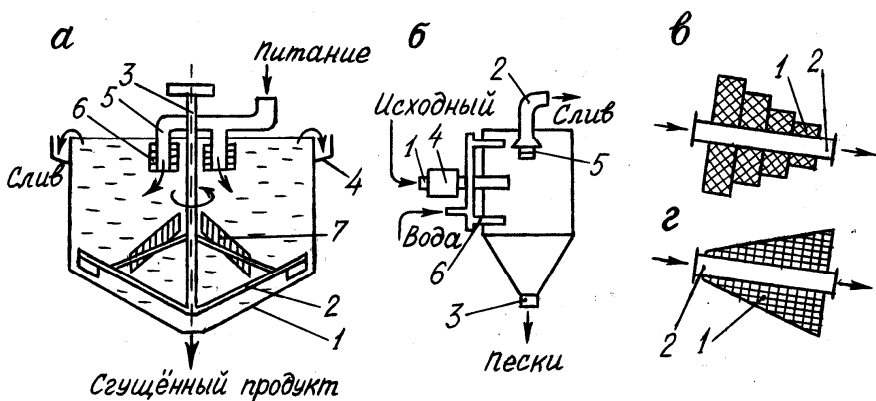


Рис. 4.8. Вспомогательное оборудование:

а – магнитный дешламатор: 1 – чан; 2 – гребковая рама; 3 – вал; 4 – сливной желоб; 5 – трубопровод исходной пульпы; 6, 7 – намагничивающие устройства; *б* – магнитный гидроциклон: 1 – патрубок исходной пульпы; 2 – сливной патрубок; 3 – песковая насадка; 4, 5 – намагничивающие устройства; 6 – патрубки для подачи дополнительной воды; *в* – размагничивающий аппарат: 1 – магнитная система; 2 – центральная труба; *г* – селективный магнитный флокулятор: 1 – магнитная система; 2 – центральная труба

долей железа в нём 7,9-22,7 %. Удельная производительность на 1 м² площади зеркала сгущения изменяется от 0,5 до 5 т/(м²·ч). Содержание твёрдого в питании составляет 10-50 %, в сгущённом продукте – 20-70 %, в сливе – 0,3-12 %. Технические характеристики дешламаторов приведены в табл. 4.8 [14].

Магнитный гидроциклон. Магнитный гидроциклон предназначен для сгущения и обесшламливания пульп.

Принципиальное отличие магнитного гидроциклона от обычного гидроциклона заключается в применении намагничивающих устройств для образования флокул. Магнитный гидроциклон (рис. 4.8, *б*) работает следующим образом. Магнетитсодержащая пульпа при движении по патрубку 1 проходит через первую магнитную систему 4 с напряжённостью до 160 кА/м. Частицы магнетита под действием магнитного поля намагничиваются и образуют флокулы. В дальнейшем флокулы через патрубок 1, установленный тангенци-

ально, попадают в цилиндрическую часть гидроциклона и под действием центробежных сил прижимаются к внутренней цилиндрической части гидроциклона, перемещаются по ней, попадают в коническую часть гидроциклона и выгружаются через песковую насадку 3. Слабомагнитные сrostки и шламы выносятся в верхнюю часть гидроциклона и разгружаются через сливной патрубок 2. У входа в сливной патрубок установлено второе намагничивающее устройство 5, магнитное поле которого способствует образованию дополнительных флокул, которые удаляются в пески. Напряжённость магнитного поля на острие полюсного наконечника второго намагничивающего устройства составляет 125 кА/м. По патрубкам 6 в гидроциклон дополнительно подаётся промывная вода, способствующая разжижению пульпы и отмывке с поверхности флокул мелких слабомагнитных и немагнитных частиц.

Обесшламливание сливов классификаторов в магнитных гидроциклонах позволяет повысить массовую долю железа на 1,5 – 2 %, а извлечение железа – на 2 - 6 %.

Таблица 4.8

Технические характеристики дешламаторов

Параметры	МД-5	МД-9	МД-12
Диаметр чана, мм	5000	9000	12000
Площадь зеркала осаждения, м ²	19,6	63,8	113
Крупность исходного питания, мм	0-0,5	0-0,5	0-0,5
Частота вращения гребковой рамы, об/мин	1,4	0,5-1,65	0,6
Напряжённость магнитного поля в середине рабочего зазора намагничивающих аппаратов, кА/м	40	40	40
Производительность по твёрдому, т/ч	45-50	110-190	200-350
Установленная мощность привода гребковой рамы, кВт	2,8	14	13
Габаритные размеры, мм:			
- длина	5400	9440	
- ширина	4700	9200	
- высота	5300	8210	
Масса без электродвигателя, т	9,8	17,9	19,5

Размагничивающие аппараты. Для дефлокуляции пульп перед процессами классификации и фильтрования применяют размагничивающие аппараты. Размагничивающие аппараты (рис. 4.8, в) состоят из трубы 2, на которой установлены катушки 1, создающие переменное магнитное поле. При размагничивании пульпа движется по трубе и пересекает переменное по направлению и уменьшающееся до нуля магнитное поле. Минимальное число циклов изменения магнитного поля при размагничивании 10-12. Технические характеристики размагничивающих аппаратов приведены в табл. 4.9.

Намагничивающие аппараты. Магнитная обработка пульп применяется с целью намагничивания и флокуляции сильномагнитных частиц. Намагничивание используется перед магнитной сепарацией для снижения потерь железа и перед процессами сгущения и дешламации для быстрого осаждения сильномагнитных флоккул.

Намагничивающие аппараты состоят из трубы и магнитной системы, создающей магнитное поле с напряжённостью 48-80 кА/м. Магнитная система устанавливается снаружи центральной трубы, иногда – внутри трубы. Для намагничивания применяются как электромагнитные системы, так и системы их постоянных магнитов.

Таблица 4.9

Технические характеристики размагничивающих аппаратов [14]

Параметры	178-СЭ	177-СЭ	165А-СЭ	176А-СЭ
Диаметр трубы пульпопровода, мм	50	100	150	200
Максимальная напряжённость магнитного поля на оси трубы, кА/м	40	40	38	40
Мощность переменного тока, кВт	2,1	5,1	6,3	11,0
Объёмная производительность по пульпе, м ³ /ч	25	85	180	300
Габаритные размеры, мм:				
- длина	930	1050	1080	1440
- ширина	458	574	635	635
- высота	492	608	670	670
Масса аппарата, кг	124	266	309	345

Для избирательной магнитной флокуляции разработан селективный магнитный флокулятор, особенностью которого является увеличивающееся по ходу движения пульпы магнитное поле. Селективный магнитный флокулятор позволяет получить “чистые” флокулы, не содержащие в ядре породных частиц. Флокулятор (рис. 4.8, з) состоит из немагнитной трубы 2, на которую установлены катушки 1 с увеличивающимся числом ампер-витков в направлении движения материала. Напряженность магнитного поля возрастает от 0 до 40 кА/м.

4.5. Производительность магнитных сепараторов

Производительность сухих барабанных (валковых) сепараторов с верхней подачей материала определяется длиной и скоростью вращения рабочего устройства (барабана) и крупностью и плотностью исходного продукта. Производительность по исходному продукту (Q) ориентировочно можно рассчитать по формуле, т/ч

$$Q = 0,82nLv\rho \frac{d_2 - d_1}{\lg(d_2 / d_1)} ab, \quad (4.1)$$

где n – число головных (верхних) барабанов; L – рабочая длина барабана или валка, м; v – скорость вращения головного барабана, м/с; ρ – плотность руды, т/м³; d_1 и d_2 – наименьший и наибольший диаметры зёрен исходного продукта, мм (при $d_1=0$ принимается $d_1=0,01d_2$); a – коэффициент, зависящий от крупности питания; b – коэффициент, зависящий от соотношения между числом основных и перечистных барабанов.

Значения коэффициентов a и b приведены в табл. 4.10. Формула (4.1) определяет производительность сепаратора для условия, когда высота слоя исходного продукта равна d_2 . В ряде случаев, если достигаются требуемые технологические показатели, можно повысить слой материала на барабане (валке), что увеличит производительность сепаратора Q .

Производительность сухих барабанных (валковых) сепараторов с нижней подачей материала определяется шириной питающего лотка, скоростью подачи питания в рабочую зону разделения, круп-

Таблица 4.10

Значение коэффициентов a и b в формуле (4.1)

Крупность питания, мм	-10+0	-20+0	-30+0	От -40+0 До -60+0	-10+5	-20+6	-30+6	От -40+6 до -60+6
Коэффициент a	2,5	1,5	1,1	1,0	1,2	0,75	0,65	0,6
Отношение числа барабанов для перемешивания хвостов к числу головных барабанов					0:1	1:2	1:1	2:2
Коэффициент b					1,0	1,25	1,5	1,5

ностью и плотностью исходного продукта, а также скоростью извлечения (удаления) магнитного продукта. Производительность по исходному продукту (Q) ориентировочно можно рассчитать по формуле, т/ч:

$$Q=3,6Kf\nu_1\rho h, \quad (4.2)$$

где K – ширина потока исходного продукта, м; f – коэффициент заполнения слоя руды; ν_1 – скорость подачи питания в рабочую зону, м/с; ρ – плотность руды, кг/м³; h – средняя высота слоя исходного продукта на питающем лотке или во впадинах нижнего полюса, м.

Коэффициент заполнения слоя руды f , по Зетлеру Я. И. и Дацику И. С., для условия монослойной подачи и прямолинейной гранулометрической характеристики исходного продукта

$$f=\pi(d_2-d_1)/(6d_2\lg(d_2/d_1)). \quad (4.3)$$

При $d_1=0,01d_2$ (для случая, когда $d_1=0$) коэффициент f теоретически равен 0,11. Теоретическое значение коэффициента f занижено, поэтому принимают $f=0,2$.

Формула (4.2) определяет пропускную способность сепаратора. Поэтому необходимо рассчитать производительность сепаратора по магнитному продукту и выполнить проверку на возможность удаления сепаратором магнитного продукта. Производительность по магнитному продукту (Q_m) ориентировочно можно рассчитать по формуле, т/ч:

$$Q_m=3,6Lf\nu_{pm} h_m, \quad (4.4)$$

где L – рабочая длина барабана или валка, м; f – коэффициент заполнения слоя руды (магнитных частиц); v – скорость вращения барабана или валка, м/с; ρ_m – плотность магнитных частиц, кг/м³; h_m – средняя высота слоя магнитных частиц на поверхности барабана или валка, м.

Сепаратор должен обеспечить полное выделение из исходного продукта магнитных частиц. Для этого необходимо выполнение следующего условия:

$$Q \leq Q_m / \alpha_m, \quad (4.5)$$

где α_m – массовая доля магнитных частиц в исходном продукте, д.ед.

Производительность мокрых барабанных (валковых) сепараторов с нижней подачей материала определяется шириной и высотой ванны, скоростью пульпы в рабочей зоне разделения, плотностью пульпы. Производительность по исходному продукту (по твёрдому) ориентировочно можно рассчитать по формуле, т/ч:

$$Q = 3,6K v_1 h \rho_{\pi} \beta_{\pi}, \quad (4.6)$$

где K – ширина ванны (ширина потока исходного продукта), м; v_1 – скорость пульпы в зоне разделения (скорость подачи питания в рабочую зону), м/с; h – высота ванны (глубина потока пульпы), м; ρ_{π} – плотность пульпы, кг/м³; β_{π} – содержание твёрдого в пульпе, д.ед.

Плотность пульпы связана с содержанием твёрдого в ней и с плотностью исходного продукта ρ зависимостью, кг/м³:

$$\rho_{\pi} = 1000 * \rho / (1000 * \beta_{\pi} + \rho (1 - \beta_{\pi})). \quad (4.7)$$

Подставив в равенство (4.6) вместо ρ_{π} её значение, получим:

$$Q = 3600K v_1 h \beta_{\pi} \rho / (1000 * \beta_{\pi} + \rho (1 - \beta_{\pi})). \quad (4.8)$$

Скорость перемещения пульпы через сепаратор прямопропорционально влияет на производительность. Допустимая скорость v_1 выбирается таким образом, чтобы обеспечить полное извлечение магнитных частиц из потока пульпы. Скорость v_1 зависит от силы магнитного поля сепаратора, магнитной восприимчивости частиц, длины и высоты зоны разделения. Увеличение плотности пульпы (содержания твёрдого в ней) позволяет несколько повысить произ-

водительность сепаратора, однако это может привести к ухудшению качества концентрата.

Расчёт производительности по удельной нагрузке

Значительный опыт эксплуатации магнитных сепараторов позволяет рассчитывать их производительность с использованием норм удельных нагрузок на 1 м ширины питания или рабочей длины барабана (валка) по формуле, т/ч:

$$Q=qK, \quad (4.9)$$

где q – удельная производительность, т/(ч*м).

Удельная производительность барабанных сепараторов ПБМ зависит от массовой доли магнитной фракции и класса –0,071 мм в питании и от содержания твёрдого в исходной пульпе. Удельная производительность сепараторов ПБМ при обогащении магнетитовых руд изменяется от 7-10 т/(ч*м) для последних операций до 50 т/(ч*м) и более для первых операций [4, 13, 14].

Удельную производительность валковых сепараторов во многом определяют крупность частиц питания, массовая доля магнитной фракции в питании и плотность частиц питания. Некоторые значения удельной производительности приведены в табл. 4.11.

Таблица 4.11
Удельная производительность валковых сепараторов

Материал	Способ обогащения	Крупность питания, мм	Удельная производительность, т/(ч*м)
Мытые марганцевые руды и промпродукты	Мокрый	-3+0	2,0-2,5
Бурожелезняковые руды	Сухой	-0,5+0	3
Стекольные пески, абразивы	Мокрый	-2+0	3,5-5,0
	Сухой	-2(1)+0	1,5-2,5
Черновые концентраты россыпных месторождений	Сухой	-0,16+0	1,0
		-1+0	1,0

Производительность высокоградиентных сепараторов определяется опытным путём и во многом зависит от пропускной способности рабочей камеры (матрицы) и массовой доли магнитной фракции в питании.

5. ПРАКТИКА МАГНИТНОГО ОБОГАЩЕНИЯ

5.1. Подготовка руды перед магнитным обогащением

К подготовительным операциям перед магнитным обогащением относятся операции грохочения, обеспыливания, обесшламливания, намагничивания, размагничивания, сушки и обжига. Необходимость применения подготовительных операций определяется свойствами обогащаемой руды и условиями процесса сепарации.

Грохочение. Операция грохочения применяется для разделения исходного продукта на два класса крупности перед сухой магнитной сепарацией. Исследования магнитных полей сепараторов показали, что сила магнитного поля $H_{grad}H$ резко снижается при удалении от полюсов магнитной системы. Это приводит к различному воздействию магнитной силы на более крупные и более мелкие куски руды при обогащении неклассифицированного материала. Операция предварительного грохочения руды позволяет сблизить верхний и нижний пределы крупности частиц в обогащаемом продукте, что повышает эффективность последующей магнитной сепарации.

Как правило, исходную руду перед магнитной сепарацией делят с помощью грохочения на два класса крупности, которые обогащают отдельно либо обогащают сухим способом только крупный класс. При обогащении сильномагнитной руды крупностью $-50+0$ мм можно получить классы крупности $-50+6(12)$ мм и $-6(12)+0$ мм, а при обогащении слабомагнитной руды (марганцевой) - крупностью $-5+0$ мм, лучшие результаты следует ожидать при отдельном обогащении классов $-5+2$ мм и $-2+0$ мм.

Выбор крупности обогащаемых классов (размер отверстия сетки грохота) определяет не только магнитная система конкретного сепаратора, но и особенности руды конкретного месторождения, такие как вид вкрапленности, способность к избирательному разрушению, закономерности распределения полезного минерала в частицах дроблёной руды различной крупности, контрастность.

При сухой магнитной сепарации сильномагнитных руд некоторых месторождений применяют более простые схемы без предва-

рительного грохочения. Предварительное грохочение используется в случае, когда эффект от прироста технологических показателей выше затрат, связанных с усложнением схемы.

Обеспыливание. Операция обеспыливания применяется для удаления мелких частиц из исходного продукта перед сухой магнитной сепарацией. Удаление тонких труднообогатимых частиц существенно повышает результаты обогащения.

Тонкие частицы обладают большой удельной поверхностью, в результате этого они под действием силы адгезии осаждаются на поверхность других частиц, на рабочие устройства сепараторов и попадают как в магнитный, так и в немагнитный продукты. Большая доля мелких частиц в исходном продукте снижает результаты обогащения, поэтому сухую сепарацию для обогащения мелкодроблённых продуктов применяют в исключительных случаях.

Обычно сепараторы для сухого обогащения имеют аспирационные патрубки для удаления пылевидных частиц. Выделенная пыль, в зависимости от свойств исходного продукта, направляется либо в хвосты, либо на дальнейшую переработку.

Обесшламливание. Операция обесшламливания применяется в схемах мокрого обогащения сильномагнитных руд для вывода в хвосты бедных тонких шламистых частиц. Большое количество тонких частиц пустой породы в обогащаемых продуктах приводит к снижению качества концентратов, так как шламистые частицы неизбежно захватываются во флоккулы и пряди и попадают с последними в магнитный продукт.

Для обесшламливания применяются магнитные дешламаторы и гидроциклоны. Операции обесшламливания наиболее распространены в схемах обогащения железистых кварцитов.

Размагничивание. Операция размагничивания применяется для дефлокуляции пульп в схемах обогащения магнетитовых руд и в схемах регенерации тяжелосредних суспензий.

В схемах обогащения магнетитовых руд размагничивание с целью разрушения флоккул применяется перед операциями классификации и фильтрования. В магнитном поле сепараторов частицы магнетита образуют флоккулы и пряди (более крупные агрегаты). Если флоккулы и пряди не разрушить, то они при классификации попа-

дут в пески и далее – в мельницу, что приведёт к увеличению циркулирующей нагрузки и переизмельчению продукта. Наличие флокул в готовом концентрате, поступающем на фильтрование, приведёт к увеличению влажности кека, так как флоккулы плохо отдают внутреннюю воду.

В схемах регенерации тяжелосредных суспензий размагничивание применяется после магнитной сепарации для разрушения флокул. Наличие флокул (более крупных агрегатов) в магнетитовой суспензии снижает её качество (устойчивость).

Намагничивание. Операция намагничивания применяется в схемах мокрого обогащения магнетитовых руд для флокуляции пульпы с целью её быстрого осаждения и возможности отмывки с поверхности флокул шламистых частиц. Намагничивание осуществляется либо в отдельных намагничивающих аппаратах, либо в дешламаторах или магнитных гидроциклонах. Использование селективного намагничивания перед магнитной сепарацией, создающего богатые флоккулы, позволяет снизить потери магнетита с немагнитным продуктом.

При сухом обогащении также иногда применяется предварительное намагничивание дроблёной руды перед сепарацией, которое позволяет снизить потери полезного компонента с немагнитным продуктом. Намагничивание осуществляется с помощью открытых многополюсных систем, магнитное поле которых воздействует на движущийся в сепаратор продукт, снижая динамическое запаздывание намагниченности частиц.

Сушка. Операция сушки применяется перед сухой магнитной сепарацией для снижения влажности исходного продукта. Повышенная влажность руды отрицательно сказывается на результатах сухого обогащения как сильномагнитных, так и слабомагнитных руд. При повышении влажности исходного продукта возрастает сила взаимного сцепления частиц и наблюдается прилипание материала к поверхности рабочих устройств сепаратора, что приводит к увеличению вероятности попадания немагнитных частиц в магнитный продукт, а магнитных частиц – в немагнитный продукт.

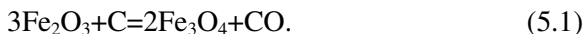
Допустимая влажность исходного продукта для сухой магнитной сепарации зависит в основном от его крупности. Так, если при

обогащении руды крупностью $-20+0$ мм влажность не должна превышать 2-3 %, то при обогащении руды крупностью $-2+0$ мм допустимая влажность снижается до 0,5-1 %.

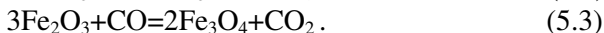
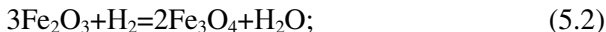
Магнетизирующий обжиг. Обжигмагнитное обогащение состоит из магнетизирующего обжига руды и последующей магнитной сепарации в слабом магнитном поле ($H=90-140$ кА/м). Обжиг является подготовительной операцией перед магнитным обогащением и позволяет перевести в соответствующей атмосфере слабомагнитные минералы и руды железа (гематит, мартит, лимонит, сидерит и др.) в сильномагнитные магнетит и маггемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$).

Магнетизирующий обжиг железных руд бывает восстановительным, восстановительно-окислительным и окислительным.

При *восстановительном* обжиге происходит восстановление слабомагнитных окислов железа (Fe_2O_3) до сильномагнитных низших окислов. В качестве восстановителей применяют бурый уголь, антрацит, коксик, доменный, генераторный и природный газы, мазуты. При использовании бурого угля, антрацита и коксика обжиг проводится при температуре 800-950 °С по уравнению



Восстановление газами происходит при температуре 600 – 850 °С по уравнениям:



Восстановительно-окислительный обжиг заключается в восстановлении слабомагнитных окислов железа до магнетита с последующим окислением магнетита до сильномагнитного маггемита ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) по уравнению



Окисление магнетита до маггемита можно производить только после охлаждения восстановленной руды до температуры, при которой устойчив маггемит (300-400 °С).

Окислительный магнетизирующий обжиг применяется для перевода слабомагнитных карбонатов железа (сидеритовые руды) в сильномагнитный магнетит по уравнению



Обжиг сидеритовой руды Бакальского месторождения производят при температуре 950-1050 °С.

Для магнетизирующего обжига применяются трубчатые вращающиеся печи, шахтные печи и печи кипящего слоя.

5.2. Обогащение сильномагнитных руд

Характеристика сильномагнитных руд

К сильномагнитным рудам относятся магнетитовые руды, которые по происхождению подразделяются на следующие основные группы: 1 – осадочно-метаморфические; 2 – контактово-метасоматические (скарновые); 3 – магматические.

К рудам осадочно-метаморфического происхождения относятся железистые или магнетитовые кварциты. *Магнетитовые кварциты* характеризуются повышенным содержанием рудных (магнетит) минералов (массовая доля железа более 30 %), пониженной массовой долей основных окислов ($\text{CaO}+\text{MgO}$ до 10 %) и повышенной массовой долей кремнезёма (SiO_2 более 35 %).

Главные рудные минералы магнетитовых кварцитов – магнетит и гематит, нерудные минералы представлены в основном кварцем, силикатами и карбонатами. Сера и фосфор, являющиеся вредными примесями, содержатся в апатите, пирите и пирротине.

К промышленным месторождениям магнетитовых кварцитов относят Лебединское (Лебединский ГОК), Коробковское (комбинат КМАруда), Михайловское (Михайловский ГОК), Стойленское, (Стойленский ГОК), Оленегорское и Кировогорское (Оленегорский ГОК) и Костомукшское (Костомукшский ГОК).

Контактово-метасоматические (скарновые) руды характеризуются повышенной массовой долей основных окислов (более 10 %) и пониженной массовой долей кремнезёма (менее 30 %). Массовая доля железа в руде изменяется для различных месторождений от 26 до 40 % и более.

Основной рудный минерал – магнетит, в небольшом количестве – гематит. К нерудным минералам относятся гранат, пироксен, амфиболы, карбонаты, плагиоклазы, эпидот, хлорит и др. Сера со-

держится в пирите, пирротине, халькопирите, сфалерите, галените, пентландите. Фосфор представлен апатитом.

К промышленным месторождениям скарновых руд относятся месторождения Урала (Нижнетагильский и Магнитогорский металлургические комбинаты), Ковдорское (Ковдорский ГОК), Коршуновское (Коршуновский ГОК) и др.

Среди магматических руд наибольшее промышленное применение нашли *титаномагнетитовые* руды, основные месторождения которых расположены на Урале (Гусевогорское, Первоуральское, Медведёвское). Наиболее значимым является Гусевогорское месторождение титаномагнетитовых руд, перерабатываемых на Качанарском ГОКе.

Титаномагнетитовые руды характеризуются более низкой массовой долей железа (14-20 %) и наличием ценных и редких примесей ванадия и титана.

Основные рудные минералы – магнетит, титаномагнетит, ильменит. Нерудные минералы представлены пироксеном, оливином, роговой обманкой, плагиоклазом, шпинелью и др.

Требования к железорудному сырью и концентратам

Железные руды и концентраты используются в доменном и сталеплавильном процессах. Металлургическая ценность железных руд и концентратов определяется массовой долей в них основного элемента (Fe), полезных (Mn, Ni, Cr, V, Ti), вредных (S, P, As, Zn, Pb, Cu, K, Na) и шлакообразующих (Si, Ca, Mg, Al) примесей.

Вредные примеси или ухудшают свойства металла, или усложняют процесс выплавки чугуна. Массовая доля серы не должна превышать 0,15 %, фосфора – 0,07-0,15 %, мышьяка – 0,05-0,1 %, цинка – 0,1-0,2 %, меди – 0,2 %. В рудах и концентратах, используемых для производства агломерата и окатышей, допустимая массовая доля серы может достигать 0,6 %.

Шлакообразующие примеси подразделяются на основные (Ca, Mg) и кислые (Si, Al). Предпочтительно более высокое отношение основных окислов к кислым.

Требования к железным рудам и концентратам приведены в табл. 5.1 [13].

Таблица 5.1

Характеристика товарных железных руд и концентратов

Сорт руды или концентрата	Массовая доля, %			Контрольный класс крупности	
	Fe	SiO ₂	влаги, не более	размер, мм	массовая доля, %
Доменная руда: - сортированная	45-53	30-33	3	0-10 80-100	Не более 15-20 Не менее 80-85
- рядовая	Не менее 46-47	30-33	4	0-100	100
Агломерационная руда	46-60	30-33	5	0-10 10-20	Не менее 82 Не более 18
Мартеновская руда	60-62	11,3	3	0-10 10-250	Не более 25 Не менее 75
Концентрат: - агломерационный	58-66	8-12	9-11,5	0,044	60-95
- высококачественный	66-70	3	10-11,5	0,044	90-98
- для порошков	70-71,8	0,4	10-11,5	0,044	90-98

Технология обогащения сильномагнитных руд

Схемы обогащения сильномагнитных железных руд включают подготовительные, основные (магнитная сепарация) и вспомогательные (удаление влаги) операции.

При магнитном обогащении к подготовительным операциям относятся операции дробления, грохочения, измельчения, классификации, размагничивания. Иногда применяют сушку, обжиг, обесшламливание, обеспыливание, намагничивание.

При дроблении железных руд применяются трёх- и четырёх-стадиальные схемы дробления. Схемы измельчения, как правило, трёхстадиальные и позволяют измельчить руду (промпродукт) до крупности 80-95 % класса –71 мкм. На ряде ГОКов (Ингулецкий, Лебединский) используются схемы самоизмельчения. Операция обесшламливания получила большее распространение при обогащении магнетитовых кварцитов.

На многих фабриках, особенно перерабатывающих скарновые и титаномагнетитовые руды, применяется сухая магнитная сепара-

ция дроблёной руды. Назначением сухой магнитной сепарации является вывод части пустой породы в хвосты перед измельчением и глубоким обогащением. Иногда сухая магнитная сепарация позволяет получить конечный крупнокусковой концентрат (руду). Кроме того, с помощью сухой магнитной сепарации можно разделить руду на два потока с целью их последующей раздельной переработки.

Хвосты сухой магнитной сепарации используются в качестве строительных материалов, что повышает комплексность использования железорудного сырья.

Руду перед сухой магнитной сепарацией дробят до крупности от 0-20 до 0-100 мм. Схемы сухой магнитной сепарации могут состоять из операций сепарации неклассифицированной дробленой руды или из операций классификации руды на мелкий и крупный класс с последующей раздельной магнитной сепарацией обоих классов или только крупного класса. В последнем случае мелкий несепарируемый класс объединяется с концентратом (промпродуктом) сухой магнитной сепарации.

Сухая магнитная сепарация в основном осуществляется в две операции. Вторая операция является контрольной для немагнитного продукта первого приёма обогащения. Магнитные продукты первой и второй операций объединяются. Для сухого магнитного обогащения применяются сепараторы типа ПБС и ЭБС.

Схемы обогащения сильномагнитных руд имеют, как правило, три стадии измельчения и от четырёх до десяти и более операций мокрой магнитной сепарации. Большее число операций мокрой магнитной сепарации характерно для фабрик, перерабатывающих железистые кварциты. Для мокрого магнитного обогащения применяются сепараторы типа ПБМ. Размагничивание продуктов используется перед классификацией и фильтрованием.

Особенностью схем мокрого магнитного обогащения является их линейность и стадийный (пооперационный) вывод хвостов из процесса. Схемы со стадийным выделением концентрата и с контрольными операциями для немагнитного продукта не получили широкого применения. Технологические схемы Костомукшского ГОКа (железистые кварциты) и Качканарского ГОКа (титаномагнетитовые руды) приведены на рис. 5.1 и 5.2.

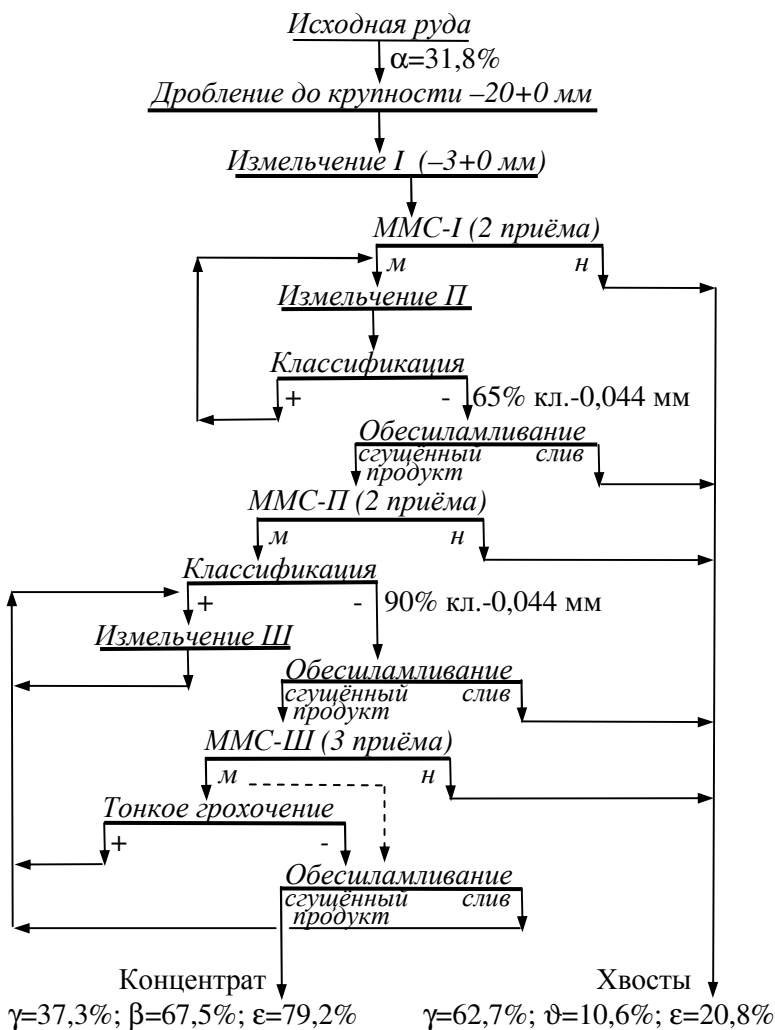


Рис. 5.1. Технологическая схема обогатительной фабрики Костомукшского ГОКа:

ММС – мокрая магнитная сепарация; м – магнитный продукт; н – немагнитный продукт (операции размагничивания не показаны)

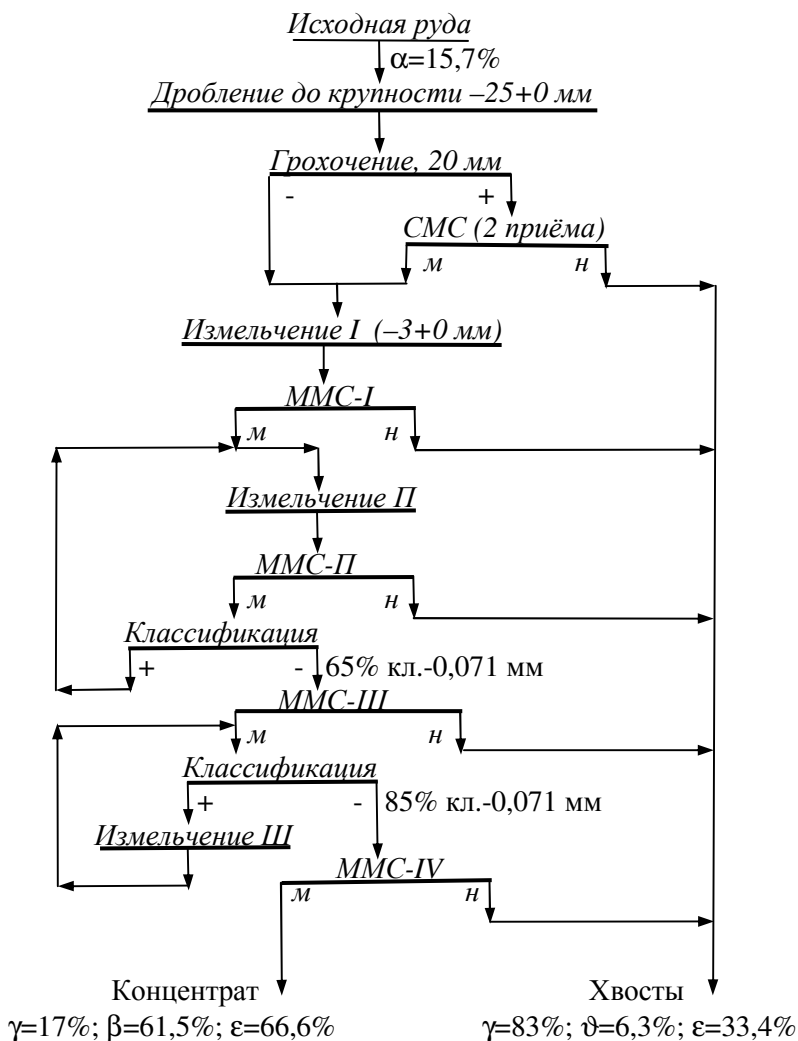


Рис. 5.2. Технологическая схема обогатительной фабрики Качканарского ГОКа:

СМС – сухая магнитная сепарация; ММС – мокрая магнитная сепарация; м – магнитный продукт; н – немагнитный продукт (операции размагничивания не показаны)

5.3. Обогащение слабомагнитных руд

К слабомагнитным рудам, обогащаемым магнитными методами, относятся окисленные железные (мартитовые, гематитовые, бурожелезняковые), сидеритовые и марганцевые руды. Кроме того, магнитные методы применяются в схемах доводки вольфрамовых концентратов и коллективных гравитационных концентратов россыпных месторождений, содержащих слабомагнитные минералы. Для обогащения слабомагнитных руд применяются сепараторы с сильным магнитным полем - валковые и высокоградиентные и в последнее время - сепараторы с системами из редкоземельных магнитов.

Технология обогащения слабомагнитных железных руд

Схемы обогащения слабомагнитных железных руд можно разделить на три вида: 1) обжиг-магнитные схемы с использованием сепараторов со слабым магнитным полем; 2) магнитные схемы с использованием сепараторов с сильным магнитным полем; 3) комбинированные гравитационно-магнитные схемы с использованием сепараторов с сильным магнитным полем.

Обжиг-магнитные схемы состоят из операции магнетизирующего обжига дроблёной руды и последующего измельчения и мокрого обогащения в сепараторах со слабым полем типа ПБС. Сидеритовые руды Бакальского месторождения (Южный Урал) перерабатывают по схеме с сухой магнитной сепарацией.

Принципиально схемы магнитного обогащения обожжённой руды не отличаются от схем обогащения сильномагнитных магнетитовых руд, так как полученный после обжига искусственный магнетит имеет магнитную восприимчивость, лишь немного меньшую, чем естественный магнетит. Особенностью схем является более сложное размагничивание флокул, вследствие большей магнитной жесткости искусственного магнетита по сравнению с естественным.

Себестоимость железного концентрата, полученного по обжиг-магнитной схеме, выше себестоимости концентрата, получаемого из сильномагнитных руд вследствие затрат на обжиг. Обжиг-магнитные схемы применяются для обогащения окисленных железистых кварцитов на ЦГОКе (Украина), бурожелезняковых руд на

Лисаковском ГОКе (Казахстан), сидеритовых руд Бакальского месторождения.

Магнитные схемы с использованием сепараторов с сильным магнитным полем имеют особенности, связанные в основном с конструкцией сепараторов и с низкими магнитными свойствами обогащаемых минералов.

Для обогащения слабомагнитных руд применяются валковые и высокоградиентные сепараторы с замкнутой рабочей зоной разделения, ограничивающей крупность исходного продукта. Поэтому некоторые схемы, особенно с применением высокоградиентных сепараторов, имеют дополнительные операции предварительного мокрого грохочения перед обогащением для предотвращения попадания в сепаратор крупных (случайных) частиц, которые могут забить его рабочую зону.

Наличие сильномагнитного магнетита в исходном продукте также может привести к забиванию (зарастанию) рабочей зоны сепаратора, особенно матриц высокоградиентного сепаратора. Очистка рабочей зоны сепаратора для слабомагнитных руд от магнетита вызывает определённые трудности, поэтому в схемах перед высокоинтенсивной сепарацией желательнее предусматривать операцию магнитной сепарации в слабом поле для выделения магнетита.

Особенностью схем обогащения слабомагнитных руд является широкое применение контрольных операций для немагнитного продукта, которые реализуются либо в отдельных аппаратах, либо в одном аппарате с несколькими рабочими органами. Ряд схем имеют и пересистные операции для магнитного продукта. Схемы, как правило, линейны без циркуляции продуктов обогащения.

На рис. 5.3 приведена технологическая схема обогащения окисленной железной руды с применением высокоградиентных сепараторов типа Джонса с феррозаклннителем в виде рифлёных пластин [6]. Схема имеет две стадии измельчения до крупности 90-95 % класса $-0,044$ мм.

Схемы обогащения измельчённых продуктов каждой стадии аналогичны. Измельчённый продукт после классификации поступает на сепарацию в слабом магнитном поле (барабанные сепараторы) для извлечения сильномагнитного магнетита. Немагнитный продукт

барабанных сепараторов поступает на сгущение и далее на мокрое грохочение для удаления из пульпы случайных частиц. Подрешётные продукты грохотов направляются на высокоградиентную сепарацию с контрольной операцией для немагнитного продукта первого приёма сепарации. Магнитные продукты всех трёх операций объединяются.

Операция сгущения перед высокоградиентной сепарацией необходима для повышения массовой доли твёрдого до 50%, что необходимо для нормальной работы сепаратора Джонса и для повышения его производительности.

Комбинированные гравитационно-магнитные схемы с использованием сепараторов с сильным магнитным полем применяются для обогащения бурожелезняковых, гематитовых и мартитовых руд. При обогащении слабомагнитные минералы железа концентрируются в тяжёлых продуктах гравитационных аппаратов и в магнитных продуктах сепараторов с сильным магнитным полем.

Магнитная сепарация применяется либо в качестве основной операции для обогащения мелких классов, либо в качестве пересчетной операции для промпродуктов гравитационного обогащения.

Технология обогащения марганцевых руд

При обогащении марганцевых руд широко применяются комбинированные гравитационно-флотационно-магнитные схемы. В технологических схемах гравитационные методы (отсадка, реже тяжелосредная сепарация) применяются для крупных классов крупности +2(3) мм, магнитная сепарация используется для мелких классов крупности –2(3) мм, флотация применяется для тонких продуктов и шламов.

В практике обогащения марганцевых руд Никопольского и Чиатурского месторождений мокрую магнитную сепарацию в сильном поле применяют для обогащения мелких классов крупности мытой руды –2(3) мм, для обогащения доизмельчённых до крупности –2(3) мм промпродуктов отсадки и для обогащения обесшламленных на гидроциклонах и классификаторах сливов промывки. Наибольшее распространение получили валковые сепараторы 4ЭВМ-38/250. Имеется положительный опыт использования высокоградиентных сепараторов для обогащения тонких продуктов.

Технология обогащения коллективных гравитационных концентратов россыпных месторождений

Особенностью песков россыпного месторождения является наличие большого количества свободных частиц минералов практически при отсутствии сростков.

Полезные минералы в россыпях имеют большую плотность, чем минералы породы, поэтому их предварительно обогащают гравитационными методами с получением коллективного концентрата. В дальнейшем осуществляется разделение коллективного чернового концентрата на отдельные продукты с помощью магнитных и электрических методов обогащения (иногда в сочетании с гравитационными и флотационными методами).

Минералы, обогащаемые магнитными методами, которые могут содержаться в титано-циркониевых россыпях, по величине магнитной восприимчивости можно расположить в ряд: *магнетит – ильменит – гранат – ставролит – монацит*. Первый минерал ряда магнетит – имеет самую большую магнитную восприимчивость, последний минерал – монацит – самую низкую (см. табл. 3.4), поэтому для извлечения магнетита необходимо слабое магнитное поле ($H=80-120$ кА/м), а для извлечения монацита – очень сильное магнитное поле ($H=1600$ кА/м).

Немагнитные минералы, содержащиеся в титано-циркониевых россыпях, обогащаются электрическими методами (рутил является проводником, циркон – непроводником).

Если в коллективном гравитационном концентрате содержится много магнитных минералов (магнетит, ильменит), то применяются схемы с магнитной сепарацией в начале процесса (рис. 5.4, а). Если в гравитационном концентрате содержится большое количество не проводящих электричество минералов (циркон, ставролит, монацит), то применяются схемы с электрической сепарацией в начале процесса (рис. 5.4, б).

При доводке черновых гравитационных концентратов россыпей, содержащих вольфрамит и касситерит, магнитная сепарация в сильном поле применяется для отделения слабомагнитного вольфрамита в вольфрамовый концентрат от немагнитного касситерита (оловянный концентрат).

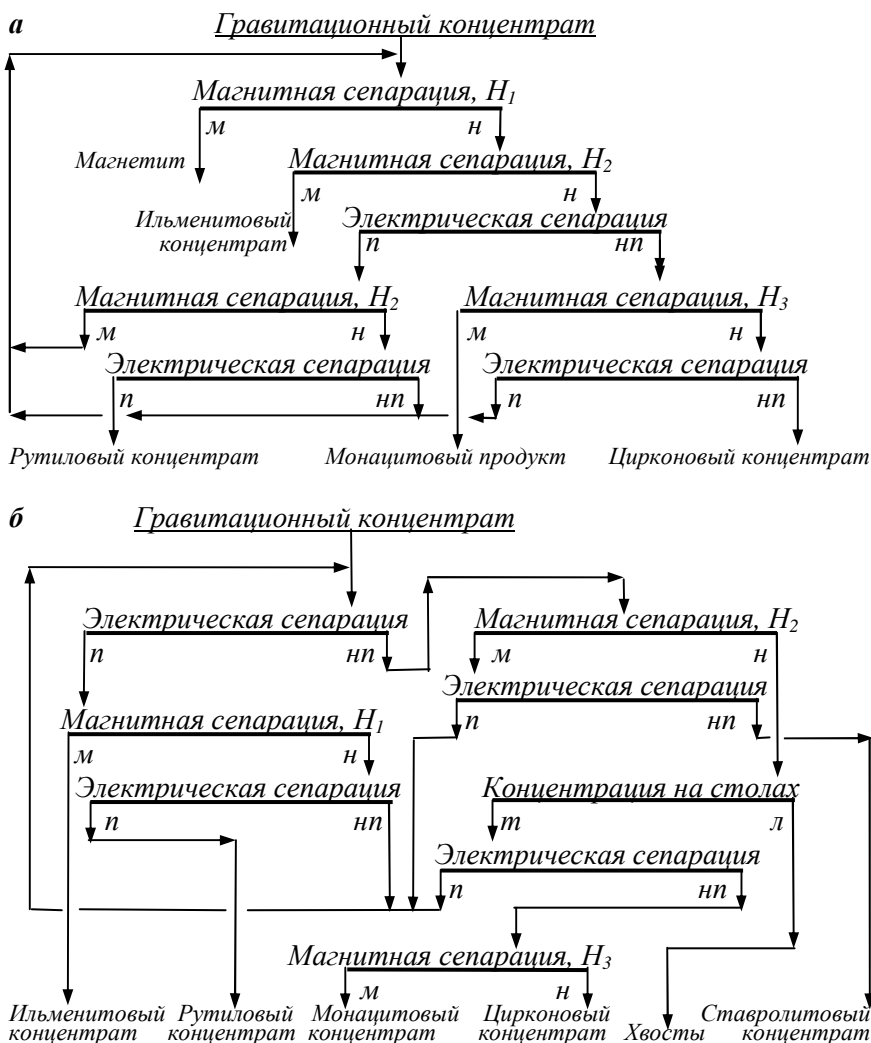


Рис. 5.4. Схемы обогащения коллективных гравитационных концентратов: а – с магнитной сепарацией в начале процесса; б – с электрической сепарацией в начале процесса (операции сушки перед электрической сепарацией не показаны). м – магнитный; н – немагнитный; п – проводники; np – непроводники; т – тяжёлый; л – лёгкий; Н – напряжённость магнитного поля ($H_1 < H_2 < H_3$)

Технология обогащения черновых гравитационных вольфрамовых концентратов

При гравитационном обогащении вольфрамовых руд концентраты содержат слабомагнитные минералы вольфрама гюбнерит и вольфрамит, а также немагнитный минерал вольфрама шеелит и другие немагнитные минералы (кварц, сульфиды, карбонаты).

Схема магнитного обогащения состоит из операций высокоинтенсивной магнитной сепарации (в два приёма) узких классов крупности ($-2+0,5$ мм и $-0,5+0$ мм) с выделением в магнитный продукт гюбнерита и вольфрамита. Немагнитный продукт поступает на измельчение и флотацию шеелита.

5.4. Обогащение неметаллических полезных ископаемых

В схемах обогащения неметаллических полезных ископаемых часто используется магнитная сепарация в слабом поле для удаления сильномагнитных случайных предметов и магнетита, а затем - в сильном поле для очистки готовых концентратов от железистых примесей. Иногда магнитная сепарация применяется в схемах для перевода в магнитный или немагнитный продукт минералов вмещающих пород.

Магнитная сепарация в сильном поле осуществляется в основном в две операции. В схемах обогащения неметаллических полезных ископаемых применяются валковые и высокоградиентные сепараторы с электромагнитными системами и сепараторы с системами из редкоземельных постоянных магнитов.

Обезжелезивание концентратов и продуктов применяется в технологических схемах получения *кварца, полевого шпата, талька, керамического (например, каолин, пегматиты и др.) и стекольного сырья, цемента, флюорита (плавикового шпата), формовочных песков* и других полезных ископаемых.

Магнитная сепарация в сильном поле применяется при обогащении глауконитовых песков. *Глауконит* является слабомагнитным минералом и концентрируется в магнитном продукте.

В схемах обогащения *алмазов* магнитная сепарация в сильном поле используется в доводочных операциях для выведения в маг-

нитную фракцию (хвосты) из продуктов крупностью менее 3 мм минералов вмещающих пород. Алмазы концентрируются в немагнитном продукте.

5.5. Обогащение вторичных металлов

Рассмотрим примеры использования магнитных методов в линиях переработки техногенного сырья.

Магнитная сепарация используется в схемах переработки дробленого кабельного лома, бронированного стальной лентой. Дроблённый бронированный кабель состоит из токопроводящих медных или алюминиевых жил, изоляционных материалов (ПВХ, бумага, ткань) и стальной или свинцовой брони. В схеме, приведённой на рис. 5.5, используется магнитный сепаратор для удаления из потока разделяемых продуктов частиц стальной брони. Сепаратор применяется барабанный с верхней подачей материала. Далее, по схеме, предусмотрены две последовательные операции магнитогидростатической сепарации при разной рабочей плотности ферромагнитной жидкости (в первой операции плотность меньше) для последовательного выделения частиц алюминия, меди и свинца. В этой же схеме используются мокрые барабанные сепараторы для регенерации ферромагнитной жидкости (извлечения магнетита).

Магнитное извлечение ферромагнитных металлов и сростков железа с цветными металлами используется в линиях сортировки смешанного лома и кусковых отходов цветных металлов. При толщине слоя исходного материала на ленте сортировочного конвейера 50-400 мм применяют двухстадийную сепарацию с нижней подачей и верхней, при толщине слоя менее 50 мм - одностадийную с верхней подачей. Для этих целей применяют подвесные и барабанные сепараторы-железоотделители.

При магнитном обогащении дробленого лома алюминиевых сплавов, состоящего из узлов самолетов, двигателей внутреннего сгорания, картеров, корпусов коробок передач, цилиндров и т. п., необходимо выделить не только куски железа, но и разделить продукт на чисто алюминиевые куски и куски алюминия с железными приделками. Эта задача решается с помощью подвесных железоот-

делителей, устанавливаемых на различной высоте. При большей высоте установки железоотделителей удаляются чисто ферромагнитные куски, при меньшей высоте - куски алюминия с железными приделками, причем чем ниже содержание железа (в виде приделок) в куске, тем меньшая должна быть высота установки железоотделителя типа ПС. В импортных линиях фирм "Lindemann" и "Hammermills" переработки низкокачественного алюминиевого лома используются барабанные сепараторы с электромагнитной системой фирмы "Steinert Koln". В зависимости от качества лома выход магнитного продукта составляет до 20 % с содержанием алюминия 8,25-

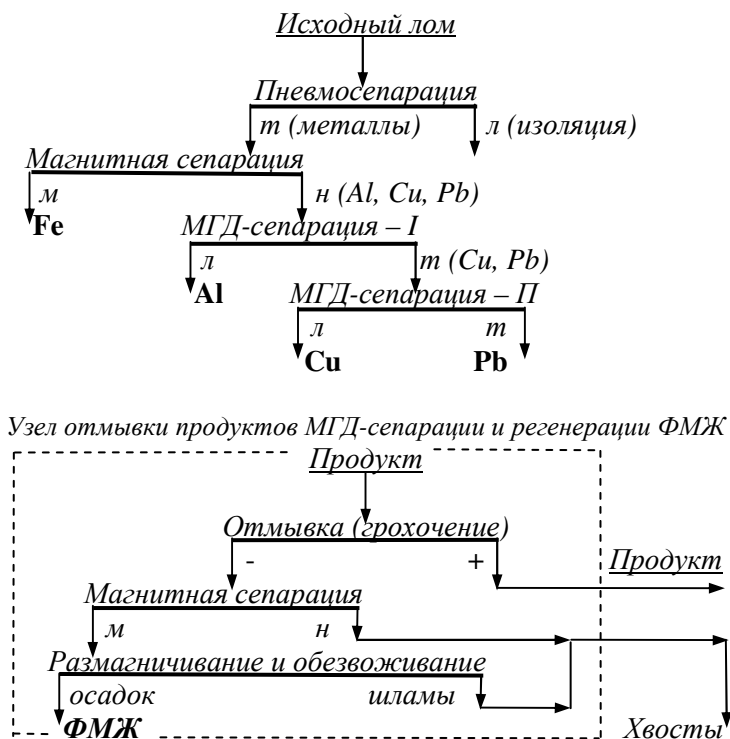


Рис. 5.5. Схема переработки дроблёного кабельного лома:

м - магнитный; н - немагнитный; л - лёгкий; т - тяжёлый

25,6 %, причем магнитный продукт содержит 5 % чисто алюминиевых сплавов, 25 % железа с приделками алюминия, до 85 и 70 % чистого железа.

Магнитная сепарация используется в схемах переработки шлаков алюминия и меди, а также в схемах переработки стружки цветных металлов для обезжелезивания продуктов. В линии сушки и магнитной сепарации алюминиевой стружки "Интал", разработанной английской фирмой "Newell Dunford", принята трехстадийная сепарация стружки от железа. При этом применяются барабанные магнитные сепараторы. На второй стадии осуществляют перечистку немагнитного продукта первой стадии, а на третьей стадии – перечистку магнитного продукта первых двух стадий. Немагнитный продукт второй и третьей стадий сепарации с содержанием железа не более 0,12 % складывается в бункера или мульды и направляется на выплавку алюминиевых сплавов в электропечах. Магнитный продукт с содержанием цветного металла 0,8-2,2 % (в зависимости от крупности сепарируемой стружки) отгружается предприятиям Вторчермета. Производительность технологической линии составляет 2,16 т/ч.

В отечественных линиях обезжелезивания алюминиевой стружки используются сепараторы ПБСЦ-63/50 и - 63/100. На Подольском заводе цветных металлов магнитная сепарация обеспечивает получение кондиционного алюминиевого концентрата, содержащего менее 0,1 % железа. Этот продукт используется для выплавки различных алюминиевых сплавов в индукционных печах. Уменьшение содержания железа в алюминиевой стружке на 0,5 % позволяет уменьшить потери алюминия со шлаками на 0,7 %, сократить расход первичного алюминия на 1,5 % и снизить расход топлива и электроэнергии.

Технологические линии разделения смешанной стружки на медной основе включают магнитную сепарацию в слабом и сильном полях. При этом в первой операции осуществляется обезжелезивание исходной стружки, во второй (и третьей) - разделение стружки на марки сплавов. Разделение предварительно обезжелевленной стружки по магнитным свойствам позволяет получать продукты для выплавки следующих сплавов: железо-марганцовистые бронзы (ла-

туни), марганцовистые бронзы (латуни) и оловянные бронзы или свинцовые латуни. Применять смешанную стружку для выплавки марочных сплавов невозможно, так как смесь стружки на медной основе содержит, %: Al - 10; Fe - 6; Zn - 20; Sn - 4; Si - 2, а также свинец, никель и другие компоненты. Такую стружку используют для выплавки подготовительных сплавов или для получения черновой меди, что приводит к потерям меди и легирующих компонентов. Кроме того, при производстве сплавов к меди вновь добавляют цинк, олово, свинец и другие легирующие компоненты, удаленные ранее при ее плавке и рафинировании. Предварительное магнитное разделение смешанной стружки на медной основе позволяет разделить стружку на продукты, пригодные непосредственно для выплавки марочных сплавов.

Магнитная сепарация применяется в линиях переработки радиоэлектронного лома. При этом используются сепараторы со слабым магнитным полем (с верхней и нижней подачей материала) и сильным магнитным полем (ЭВС). Назначение операций различное: обезжелезивание; выделение ферромагнитных токопроводящих элементов и отдельных радиодеталей с повышенным содержанием благородных металлов; извлечение слабомагнитных цветных металлов. Если получаемый магнитный концентрат является конечным продуктом, поступающим в дальнейшую гидрометаллургическую или металлургическую переработку, то большое значение приобретают вопросы его обеспыливания. Для получения магнитного продукта из дробленого радиоэлектронного лома с пониженным содержанием пылевидных частиц применяют сепараторы с нижней подачей исходного материала (подвесные ленточные и шкивные) и барабанные высокоскоростные (центробежные) сепараторы с верхней подачей исходного материала с чередованием полюсов магнитной системы по периметру барабана (по ходу движения разделяемого материала). Дополнительно используют аспирационные системы для отсоса пыли.

В технологических схемах переработки твердых бытовых отходов магнитное обогащение применяется для извлечения кусковых и мелкодробленых ферромагнитных элементов (железный концентрат) и для получения оловосодержащего концентрата (кон-

сервные банки). Используют как подвесные сепараторы, так и барабанные или комбинацию обоих (при большом слое материала на транспортной ленте). Кроме магнитной сепарации в схемах переработки твёрдых бытовых отходов применяется электродинамическая сепарация для выделения немагнитных металлов (Cu, Al), а также электрическая сепарация для разделения полимерной плёнки и бумаги. Принципиальная схема переработки твёрдых бытовых отходов приведена на рис. 5.6.

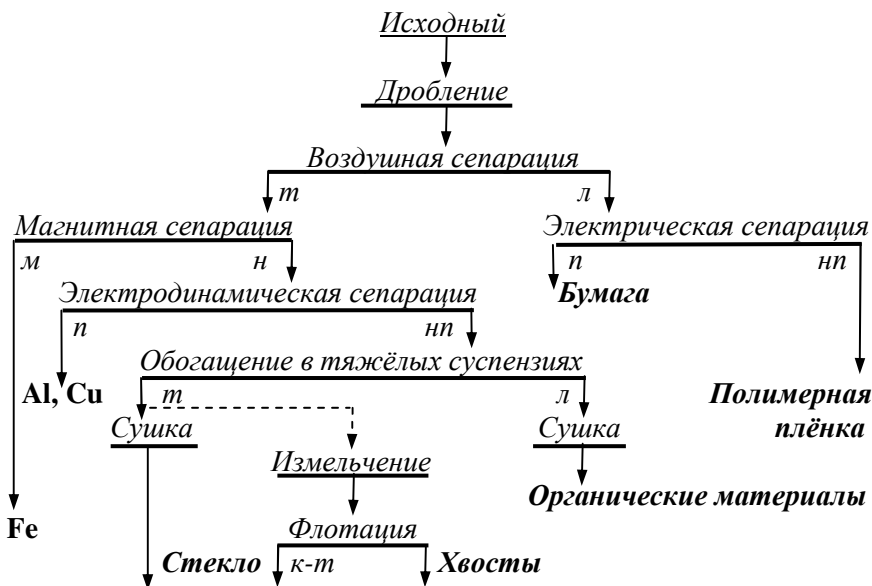


Рис. 5.6. Принципиальная схема переработки твёрдых бытовых отходов:
 м – магнитный; н – немагнитный; n – проводники; np – непроводники; л – лёгкий; t – тяжёлый

Магнитное обогащение находит применение для доизвлечения металлов из шлаков металлургического производства. При этом концентратом может быть как магнитный продукт (если обогащаются шлаки «магнитных» металлов), так и немагнитный продукт (если обогащаются шлаки «немагнитных» металлов).

Магнитная сепарация в сильных магнитных полях в водной среде находит применение при дообогащении шламов и хвостов обогатительных фабрик. Известны положительные результаты мокрого магнитного обогащения шламов марганцевых и окисленных железных руд, хвостов урано- и золотоперерабатывающих фабрик и других продуктов (забалансовых слабомагнитных руд, промпродуктов и шламов). Для этих целей используются роторные (валковые) сепараторы и высокоградиентные (полиградиентные).

Часть вторая. **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ**

**6. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ**

Первым аппаратом, положившим начало развитию электрических методов обогащения, стал электростатический сепаратор для очистки зёрен хлопка, изобретённый Гольтцом в 1870 году. Первый патент на способ электрической сепарации золота от кварца зарегистрирован в 1881 году. В 1901 г. Л.Блек и Д.Моршер изобрели электростатический сепаратор для разделения проводниковых и непроводниковых частиц. Этот сепаратор в 1905 г. был усовершенствован Гуффом и в 20-е годы XX века нашёл промышленное применение.

Г. Джонсон в 30-е годы XX века усовершенствовал электрическую часть сепаратора Гуффа. Тогда же он установил явление обратимости минералов. В 1936 году Н. Ф. Олофинский, М. В. Бачковский и П. М. Рывкин изобрели новый способ электрической сепарации - коронный [5].

В настоящее время в России разработаны и выпускаются различные конструкции электрических сепараторов, реализующие все методы электрического разделения частиц.

Электрическая сепарация применяется для обогащения, классификации и обеспыливания зернистых сыпучих материалов крупностью *менее 5 мм*, переработка которых другими методами малоэффективна или невыгодна с экономической точки зрения. Процесс электрического обогащения осуществляется в воздушной среде (кроме диэлектрической сепарации), поэтому его применение особенно перспективно в маловодных районах.

Методы электрического обогащения в основном применяются в сочетании с другими методами (гравитационным, магнитным).

Электрические методы применяются:

- для обогащения руд чёрных и других металлов (слабомагнитные железные и другие руды, минералы россыпных месторожде-

ний, черновые оловянные и вольфрамовые концентраты, черновые концентраты редкоземельных металлов);

- обогащения неметаллических полезных ископаемых (кварц, полевой шпат, угольная мелочь, слюда и др. сырьё);

- обогащения вторичных металлов (лом цветных и чёрных металлов, твёрдые бытовые отходы и др. сырьё)

- обеспыливания и классификации различных видов сырья (строительные материалы, неметаллические и металлические полезные ископаемые).

7. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ОБОГАЩЕНИЯ

7.1. Сущность и классификация электрических методов обогащения

Электрический метод обогащения основан на различии в электрических свойствах подлежащих разделению компонентов (частиц) исходного сырья. Электрическое обогащение осуществляется в электрических сепараторах, особенностью которых является наличие в их рабочей зоне электрического поля, которое по-разному действует на разделяемые частицы.

В рабочей зоне электрических сепараторов на частицы действуют электрические силы: 1) сила электростатического поля; 2) сила зеркального отображения; 3) пондеромоторная сила.

Силы электростатического поля и зеркального отображения (Кулоновы силы) действуют на частицы только тогда, когда частицы имеют заряд. Если разделяемые частицы будут иметь различные заряды или по знаку, или по величине, то эти частицы можно разделить под действием электрических сил. При этом одноимённо заряженные тела (частицы и электроды сепаратора) будут отталкиваться, а разноимённо заряженные тела – притягиваться. Величина заряда зависит от свойств частиц – электрической проводимости и размера.

Частицы проводников и непроводников (диэлектриков), не имеющие заряда, по-разному взаимодействуют с электрическим полем (заряжаются). При электрической сепарации наиболее важными

процессами являются электростатическая индукция (электризация через влияние) для проводников и поляризация диэлектриков.

Электростатическая индукция. Если в электрическое поле поместить частицу-проводник, то в ней будет наблюдаться движение электрических зарядов: положительных к отрицательному электроду, а отрицательных - к положительному. В результате перемещения свободных зарядов на стороне проводника, обращенной к положительному электроду, образуется избыточный отрицательный заряд, а на стороне, обращенной к отрицательному электроду, - равный по абсолютному значению избыточный положительный заряд. Если частица выйдет из зоны действия электрического поля без контакта с электродом, то наведённый в ней заряд исчезнет.

Если частица соприкоснется с электродом, то с неё стечёт заряд, разноимённый по знаку с этим электродом, а одноимённый заряд останется и частица оттолкнется от электрода. Частицы проводников очень быстро получают заряды, разряжаются и перезаряжаются в электрических полях.

Поляризация диэлектриков. У диэлектриков (непроводников) положительные и отрицательные заряды связаны между собой и не могут свободно перемещаться под действием поля. Под влиянием электрического поля связанные электрические заряды диэлектрика могут только смещаться (произойдёт ориентация диполей), причём тем больше, чем выше напряжённость поля. Положительные заряды диполей будут направлены к отрицательному электроду, а отрицательные заряды – к положительному электроду. На поверхностях диэлектрика, обращенных к электродам, образуются слои uncompensated зарядов.

Поляризованные или предварительно заряженные частицы диэлектриков при контакте с электродом сепаратора притягиваются к нему, так как они очень медленно разряжаются и перезаряжаются.

Пондеромоторная электрическая сила появляется только в неоднородном электрическом поле и зависит от разницы в диэлектрических проницаемостях разделяемых частиц ϵ_1 и ϵ_2 и среды разделения ϵ_c (обычно жидкий диэлектрик). Если $\epsilon_1 > \epsilon_c$, то такая частица втянется в область поля с большей напряжённостью, если $\epsilon_2 < \epsilon_c$,

то такую частицу электрическое поле вытолкнет в участок с низкой напряжённостью.

Механические силы. К механическим силам, действующим на частицы при электрическом обогащении, относятся силы тяжести, центробежная, адгезии и сила сопротивления среды. Характер действия этих сил на разделяемые частицы рассмотрен в первой части.

Среди многообразия процессов электрического обогащения по используемому свойству для разделения можно выделить четыре основных способа сепарации.

1. Сепарация, при которой реализуется разделение по электрической проводимости. При этом способе исходный продукт делится на проводники, полупроводники и непроводники (диэлектрики). Способ реализуется в электростатических, коронных и коронно-электростатических сепараторах.

2. Сепарация, при которой реализуется разделение по диэлектрической проницаемости. При этом способе исходный продукт делится на частицы с большим и меньшим значением диэлектрической проницаемости. Способ реализуется в диэлектрических сепараторах.

3. Сепарация, при которой реализуется разделение по способности частицами получать трибозаряд. При этом способе исходный продукт делится на частицы, получившие в результате трибоэлектризации положительный и отрицательный заряд. Способ реализуется в трибоэлектростатических сепараторах.

4. Сепарация, при которой реализуется разделение по крупности. При этом способе частицы однородного материала получают заряд, пропорциональный их крупности. Чем больше крупность частиц, тем меньший удельный заряд она получит. Способ применяется для однородных по минеральному составу продуктов и реализуется в трибоадгезионных и коронных сепараторах.

Кроме вышеперечисленных способов сепарации отдельно выделяют пневмоэлектросепарацию, при которой транспортирование исходного продукта осуществляют воздушным потоком, и другие менее распространённые способы сепарации – флюидизационно-электростатическую, пироэлектростатическую, коронно-магнитную, оптико-электрическую.

По способу сообщения заряда частицам и основным электрическим силам, действующим на разделяемые частицы, электрические сепараторы подразделяют: 1) на электростатические; 2) коронные; 3) коронно-электростатические; 4) трибоэлектростатические; 5) трибоадгезионные; 6) диэлектрические.

7.2. Электрические силы, действующие на частицы при электрическом обогащении

Сила электростатического поля проявляется при взаимодействии заряженной частицы с полем и вызывает, в зависимости от знака заряда, притяжение или отталкивание частицы от электрода. Если частица будет иметь одинаковый по знаку заряд с электродом, то она оттолкнётся от электрода. Если знаки зарядов разные, то электрод будет стремиться притянуть к себе частицу.

Сила электростатического поля или сила Кулона

$$F_z = q E, \quad (7.1)$$

где q – заряд частицы, Кл; E – напряжённость электрического поля, В/м.

Напряжённость для точечного заряда

$$E = q / (4\pi\epsilon\epsilon_0\Delta^2), \quad (7.2)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума или диэлектрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $\epsilon\epsilon_0 = \epsilon_a$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; Δ – расстояние от точечного заряда до электрода, м.

Подставляя значение напряженности электрического поля в формулу (7.1), получим:

$$F_z = q^2 / (4\pi\epsilon\epsilon_0\Delta^2). \quad (7.3)$$

Если взаимодействуют два различных заряда, то формула (7.3) будет иметь вид

$$F_z = q_1 q_2 / (4\pi\epsilon\epsilon_0\Delta^2), \quad (7.4)$$

где q_1 и q_2 – заряды взаимодействующих частиц, Кл.

Анализируя формулы (7.3) и (7.4), можно отметить следующее. Сила электростатического поля прямо пропорционально зависит от квадрата заряда частицы или от произведения зарядов двух взаимодействующих тел и обратно пропорционально зависит от квадрата расстояния между частицей и электродом. Сила электростатического поля максимально действует на частицу, когда частица находится на электроде или вблизи него.

Сила зеркального отображения проявляется при нахождении заряженной частицы на электроде и вблизи электрода. Если частица имеет остаточный заряд, то в проводящем электроде вследствие электростатической индукции наводится заряд противоположного знака, но той же величины и на том же расстоянии (в противоположную сторону) от поверхности электрода. Наведённый частицей заряд в электроде «зеркально» отображает заряд частицы, поэтому Кулонова сила взаимодействия частицы с электродом получила название силы зеркального отображения (F_3):

$$F_3 = q_{\text{ост}}^2 / (4\pi\epsilon\epsilon_0 l^2), \quad (7.5)$$

где $q_{\text{ост}}$ – остаточный заряд на частице, Кл; l – расстояние между центрами частицы и индуцированного заряда в электроде, м; $l/2$ – расстояние от центра частицы до электрода, м.

Для случая, когда частица лежит на электроде $l=2r$, формула (7.5) выглядит следующим образом:

$$F_3 = q_{\text{ост}}^2 / (16\pi\epsilon\epsilon_0 r^2), \quad (7.6)$$

где r – радиус частицы, м.

Сила зеркального отображения всегда стремится удержать частицу у поверхности электрода и действует в основном на частицы-диэлектрики, которые долго сохраняют свой заряд. Сила зеркального отображения, как и сила электростатического поля, максимальна, когда частица соприкасается с электродом. При удалении заряженной частицы от электрода сила F_3 резко снижается.

Кроме сил Кулона, зависящих от заряда взаимодействующих тел и расстояния между ними, на частицы в неоднородном электрическом поле действует *пондеромоторная электрическая сила* ($F_{\text{п}}$), не зависящая от заряда частицы:

$$F_{\pi} = 4\pi\epsilon_c\epsilon_0r^3E\text{grad}E(\epsilon_q-\epsilon_c)/(\epsilon_q+2\epsilon_c), \quad (7.7)$$

где ϵ_q, ϵ_c – диэлектрическая проницаемость соответственно частицы и среды; $\text{grad}E=dE/dx$ – градиент напряжённости электрического поля или производная напряжённости в направлении её максимального изменения, В/м².

Пондеромоторная сила действует на частицы только в неоднородном электрическом поле, когда $\text{grad}E \neq 0$. При $\epsilon_q > \epsilon_c$ сила F_{π} положительна и стремится втянуть частицу в участки поля с большей напряжённостью. При $\epsilon_q < \epsilon_c$ сила F_{π} отрицательна и стремится вытолкнуть частицу из более интенсивных в более слабые участки электрического поля.

Большинство процессов электрической сепарации происходит в воздушной среде при нормальной температуре и давлении, поэтому $\epsilon_c \approx 1$, тогда

$$F_{\pi} = 4\pi\epsilon_0r^3E\text{grad}E(\epsilon_q-1)/(\epsilon_q+2). \quad (7.8)$$

Пондеромоторная сила, действующая на частицу, максимальна при высоком значении $E\text{grad}E$. Для частиц-проводников величина ϵ_q достаточно высока, поэтому для проводников можно записать:

$$F_{\pi} = 4\pi\epsilon_0r^3E\text{grad}E. \quad (7.9)$$

Сила электростатического поля, даже для частиц крупностью около 1 мм, превышает пондеромоторную силу в сотни раз, поэтому последней силой при некоторых расчётах можно пренебречь.

7.3. Методы сообщения частицам электрических зарядов

Для осуществления большинства процессов электрической сепарации (исключая диэлектрическую сепарацию) разделяемым частицам необходимо сообщить заряды, отличающиеся знаком и (или) величиной. Увеличение различий в зарядах разделяемых частиц приводит к повышению эффективности электрического обогащения. Практическое применение нашли следующие способы сообщения зарядов частицам: контакт частицы с заряженным электродом; осаждение ионов на частицу; трибоэлектризация частицы.

Сообщение зарядов путём непосредственного контакта частицы с заряженной поверхностью (электродом) применяется при разделении минералов по электрической проводимости и осуществляется в электростатических и, для частиц-проводников, в коронных сепараторах.

При касании частицами электрода начинается процесс их электризации, который зависит от напряжённости электрического поля на электроде, от электрической проводимости частиц и от контактного сопротивления.

На частицу-проводник, имеющую высокую электрическую проводимость и низкое сопротивление в зоне контакта с электродом, заряд натекает быстро. Частица-проводник, получив одноименный заряд от электрода, оттолкнётся от электрода, причём тем сильнее, чем больший заряд она получит. Предельный теоретический заряд для проводящей сферической частицы

$$q_{\infty} = (2/3)\pi^3 \epsilon_0 r^2 E_{\pi}, \quad (7.10)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; r – радиус частицы, м; E_{π} – пробивная напряжённость поля плоского конденсатора, В/м.

Диэлектрики имеют низкую электрическую проводимость и высокое контактное сопротивление, поэтому заряд на них натекает медленно. Кроме того, частица-диэлектрик у заряженного электрода поляризуется и стремится удержаться на электроде.

Эффективность процесса электрического обогащения зависит от разности в полученных зарядах разделяемых частиц. Если частицы проводника и диэлектрика предварительно зарядить, например, отрицательно в поле коронного разряда, а затем поместить на электрод сепаратора, то разность в зарядах разделяемых частиц будет значительно выше, чем при чисто контактном способе зарядки незаряженных частиц.

При контакте предварительно отрицательно заряженной частицы-проводника с положительным электродом, с частицы заряд стечёт очень быстро вследствие её высокой электрической проводимости и низкого контактного сопротивления. Далее частица-проводник также очень быстро получит положительный заряд кон-

тактным способом и оттолкнётся от электрода. Предварительно отрицательно заряженная частица-диэлектрик будет разряжаться на положительном электроде медленно и притянется к нему. Различия в зарядах частиц проводников и диэлектриков существенно возрастут, что положительно скажется на их последующем разделении.

Таким образом, основными факторами, влияющими на различия в зарядах разделяемых частиц при контактном способе сообщения заряда, являются напряжённость электрического поля на электроде, электрическая проводимость и крупность частицы и начальный заряд частиц.

Сообщение заряда путём осаждения ионов на частицах осуществляется в поле электрического коронного разряда в газах, сопровождающегося ионизацией воздуха.

Коронный разряд возникает только в неоднородном электрическом поле между двумя электродами, один из которых имеет весьма малый радиус кривизны и называется коронирующим (провода, иглы и т. п.), а другой большой радиус и называется разрядным, или осадительным (барабан, плоскость). Коронирующие электроды электрических сепараторов обычно присоединяют к отрицательному полюсу источника высокого напряжения, а осадительные электроды – к положительному (их заземляют).

Напряжённость электрического поля вблизи коронирующего электрода значительно выше, чем у осадительного и, при определённой разности потенциалов, у коронирующего электрода произойдёт коронный разряд, сопровождаемый ионизацией воздуха. Образующиеся при этом положительные ионы движутся к отрицательно заряженному коронирующему электроду и отдают ему свой заряд. Отрицательные ионы движутся к противоположному, положительному, электроду, заполняя собой межэлектродное пространство. Отрицательные ионы воздуха осаждаются на частицах и заряжают их. Причём и проводники, и диэлектрики получают отрицательный заряд, величина которого пропорциональна крупности частиц и почти не зависит от электрических свойств частиц.

Дальнейшее разделение частиц, получивших заряд в поле коронного разряда, осуществляется либо по крупности, либо по электрической проводимости. *При разделении по крупности* мелкие ча-

стицы, получившие высокий удельный (отнесённый к единице массы частицы) отрицательный заряд, будут притягиваться к положительному электроду, отклоняясь из потока исходного продукта. Крупные частицы своей первоначальной траектории движения менять не будут, так как не получают достаточной для отклонения величины заряда. *При разделении по электрической проводимости* необходимо осуществить селективную разрядку частиц-проводников вследствие одинакового заряда (по знаку и величине) у частиц-проводников и частиц-диэлектриков. Для этого смесь частиц, после зарядки в поле коронного разряда, подают на разрядный электрод. Дальнейшая разрядка и зарядка частиц осуществляются путём контакта с электродом (рассмотрено выше).

Величина максимального теоретического заряда для частицы сферической формы

$$q_{\infty} = 4\pi\epsilon_0[1 + 2(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)]r^2E_k, \quad (7.11)$$

где ϵ_0 и ϵ – диэлектрическая проницаемость вакуума и частицы; r – радиус частицы, м; E_k – напряжённость поля короны, В/м.

Максимальный заряд для проводящей частицы ($\epsilon_{\pi} = \infty$)

$$q_{\infty}^{\pi} = 12\pi\epsilon_0r^2E_k. \quad (7.12)$$

Динамика получения заряда частицами в поле коронного разряда рассчитывается по формуле М. Потенье

$$q(t) = q_{\infty}(knet)/(4\epsilon_0 + knet), \quad (7.13)$$

где k – подвижность ионов, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; n – концентрация ионов в данной точке коронного разряда, $\text{ион}/\text{м}^3$; e – заряд иона, равный элементарному заряду $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; t – время зарядки, с.

Из формул (7.10)–(7.12) видно, что максимальный заряд прямо пропорционален квадрату радиуса частицы. Однако траектория движения частиц в рабочей зоне сепаратора больше зависит не от общего заряда частицы, а от удельного заряда, отнесённого к единице массы. Удельный заряд частицы обратно пропорционален радиусу (размеру) частицы, поэтому мелкие частицы, получающие меньший абсолютный, но больший удельный заряд, отклоняются (отталкиваются или притягиваются) сильнее под действием электрических сил, чем крупные частицы.

Удельный заряд, отнесённый к единице массы шарообразной частицы, например, полученный в поле коронного разряда:

$$q'_{\infty} = q_{\infty} / m = q_{\infty} / [(4/3)\pi r^3 \rho] = 3\epsilon_0 E_K [1 + 2(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)] / (r\rho), \quad (7.14)$$

где ρ - плотность частицы, кг/м³.

Сообщение заряда трибоэлектризацией. При трении разнородных физических тел друг о друга они заряжаются равными по абсолютной величине, но различными по знаку электрическими зарядами. Знак электрического заряда, получающегося при трении тел, зависит от свойств этих тел, от состояния их поверхности и других причин. Поэтому одно и то же тело при трении может электризоваться как положительно, так и отрицательно.

Трибоэлектризация предусматривает обязательный контакт частицы с зарядным элементом сепаратора (подложкой) или с частицей другого минерала. В момент разрыва контакта между подложкой и частицами на них возникают заряды, знаки которых определяются соотношением диэлектрических проницаемостей частиц и подложки. Получаемые заряды контактирующих тел всегда различного знака, так как выполняется закон сохранения получаемых зарядов:

$$\sum_{i=1}^n q_i = 0. \quad (7.15)$$

Заряд шарообразной частицы при единичном контакте её с подложкой определяется по выражению

$$q_K = \sigma S_K, \quad (7.16)$$

где σ - плотность заряда двойного электрического слоя в зоне контакта частицы и подложки, Кл/м²; S_K - площадь контакта, м².

Значительная часть полученного трибозаряда при разрыве контакта нейтрализуется благодаря токам утечки через контактное сопротивление и за счёт газового разряда при разрыве контактирующих тел.

При трибоэлектростатической сепарации электризацию разделяемых частиц производят двумя способами: 1) путём взаимодействия частиц друг с другом в специальных устройствах или при транспортировании; 2) путём взаимодействия частиц со специаль-

ными поверхностями при транспортировании в зону разделения сепаратора. Если в процессе трибоэлектризации частицы одних минералов получают положительный заряд, а частицы других минералов – отрицательный, то эти частицы в дальнейшем можно разделить в электростатическом поле.

При контактировании диэлектрика с металлом получают положительно заряженный металл и отрицательно заряженный диэлектрик. При окислении металла он при контакте с диэлектриком может электризоваться отрицательно. Для определения заряда контактирующих диэлектриков применяют *правило Козна: положительный заряд получает диэлектрик с большей диэлектрической проницаемостью.*

Некоторые вещества и минералы можно расположить в трибоэлектрический ряд, в котором при трении двух входящих в него веществ каждое последующее заряжается отрицательно, а предыдущее – положительно. Ряд ученого Гезехиуса связан с твёрдостью (указана в скобках): [+] алмаз (10); топаз (8); горный хрусталь (7); гладкое стекло (5); слюда (3); сера (2); воск (1) [-]. Гезехиус отмечал, что диэлектрики располагаются в ряд в порядке убывания их твёрдости. Металлы имеют обратную зависимость – более твёрдые металлы при взаимном контакте получают отрицательный заряд. Гезехиус также установил, что при трении двух химически одинаковых тел положительно заряжается тело с более плотной структурой. Например, согнутая эбонитовая палочка при трении об эбонит даёт положительный заряд на вогнутой стороне, а отрицательный – на выпуклой.

Для сообщения трибозаряда частицам в сепараторах чаще используется контакт частиц со специальной поверхностью (подложкой). Обеспечение контакта частиц с подложкой осуществляется при вибротранспортировании (для относительно крупных частиц) или при пневмотранспортировании (для мелких частиц) материала в зону разделения. Подложки трибоэлектростатических сепараторов заземлены для снятия свободных зарядов.

Заряд, получаемый частицами при трибоэлектризации, зависит от параметров транспортирования (частота и амплитуда вибраций,

скорость перемещения частиц, время транспортирования) и от свойств материала (крупность, влажность и температура).

Другие способы сообщения зарядов частицам, такие, как зарядка минералов при деформации и разрушении, пирозлектрическая зарядка путём нагрева, зарядка при фотоэмиссии электронов, при электрическом обогащении не получили распространения.

7.4. Электрические свойства минералов и их измерение

К электрическим свойствам минералов, по которым осуществляется разделение, относятся электрическая проводимость и диэлектрическая проницаемость. Электрические свойства минералов, как и магнитные, не являются постоянными физическими величинами, они зависят от состояния поверхности частиц (окисление, загрязнение), от влажности и температуры.

Электрическая проводимость – это величина, обратная электрическому сопротивлению:

$$G=1/R, \quad (7.17)$$

где G – электрическая проводимость, См; R – электрическое сопротивление, Ом.

Общая электрическая проводимость частицы равна сумме проводимостей поверхности частицы и её объёма, поэтому особое значение имеет чистота поверхности частицы.

Удельная электрическая проводимость (σ , См/м) при постоянном сечении частицы определяется по формуле

$$\sigma = Gl/S, \quad (7.18)$$

где l – расстояние между электродами, м; S – сечение частицы, м².

Удельная электрическая проводимость используется для классификации минералов по проводимости: 1) проводники с удельной электрической проводимостью более 10⁻¹ См/м; 2) полупроводники с σ от 10⁻⁸ до 10⁻¹ См/м; 3) диэлектрики или непроводники с σ менее 10⁻⁸ См/м.

Диэлектрической проницаемостью (ϵ) называется отношение сил взаимодействия зарядов в вакууме и в среде:

$$\epsilon = F_0/F, \quad (7.19)$$

где F_0 , F - сила взаимодействия электрических зарядов соответственно в вакууме и в среде, H .

Диэлектрическая проницаемость - величина безразмерная.

Электрические свойства некоторых минералов приведены в табл. 7.1.

Влияние влажности и температуры на электрические свойства минералов. Влажность среды приводит к поглощению воды гигроскопичными минералами и к изменению поверхностной составляющей электрической проводимости. При удельной электрической проводимости порядка 10^{-6} См/м и менее влажность образцов минералов не оказывает существенного влияния на их проводимость. Влажность минералов влияет также и на диэлектрическую проницаемость. Повышение влажности по-разному влияет на изменение электрических свойств для каждого конкретного минерала, но, как правило, с ростом влажности минерала происходит увеличение электрической проводимости и диэлектрической проницаемости. Температура минерала оказывает сильное влияние на его электрическую проводимость. Электрическая проводимость проводников, диэлектриков и полупроводников с ростом температуры может сильно изменяться.

Определение электрической проводимости (электрического сопротивления) минералов

Прибор для измерения электрического сопротивления диспергированных проб (рис. 7.1, а) состоит из корпуса 1, нижнего электрода 2 и верхнего электрода 5, между которыми устанавливается стеклянная трубка 3, заполненная измельчённой пробой минерала 4. Верхний электрод 5 поджимается к образцу пружиной 6. Провода от электродов подключаются к схеме измерения сопротивления. Для перехода к электрической проводимости используются формулы (7.17) и (7.18).

Прибор для измерения электрического сопротивления монолитных образцов имеет аналогичную конструкцию. Между электродами помещается исследуемый образец с заданными геометрическими размерами, например, сечением 5 x 5 мм и высотой 15 мм (стеклянная трубка отсутствует). Торцы образца для лучшего контакта с электродами должны быть отшлифованными.

Таблица 7.1

Электрические свойства минералов [5, 12]

Минерал	Диэлектрическая проницаемость	Удельная электрическая проводимость, См/м										
		проводники			полупроводники			непроводники				
		10 ⁴	10 ²	0	10 ⁻²	10 ⁻⁴	10 ⁻⁶	10 ⁻⁸	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁴	и менее
Алмаз	5,7								-----			
Апатит	5,8								-----			
Барит	6,2-7,9								-----			
Берилл	3,9-7,7							-----				
Биотит	10,3							-----				
Вермикулит	9,5-13,5							-----				
Вольфрамит	12,5			---								
Галит	5,6-6,4								-----			
Галенит	>81	-----										
Гематит	25		-----									
Гранат	3,5-4							-----				
Золото	>81	----										
Ильменит	33,7-81	----										
Кальцит	7,5-8,7							-----				
Касситерит	24	-----			-----			-----				
Кварц	4,5-6,0									-----		
Магнетит	33,7-81	-----										
Магнезит	4,4					-----						
Монацит	3,0-6,6							-----				
Мусковит	6,2-8,0							-----				
Пирит	33,7-81	-----										
Пирротин	>81	-----										
Пирролюзит	>81	-----										
Платина	>81	----										
Рутил	89-173	-----										
Серебро	>81	-----										
Сидерит	5,2			-----								
Сильвин	6,0							-----				
Сфалерит	5,0-6,0	--	-----		--							
Тальк	5,8							-----				
Флюорит	6,2-8,5								-----			
Флогопит	7,0									-----		
Халькопирит	>81	-----										
Хромит	11,0								-----			
Циркон	3,6-5,2							-----		-----		
Шеелит	3,5								-----			

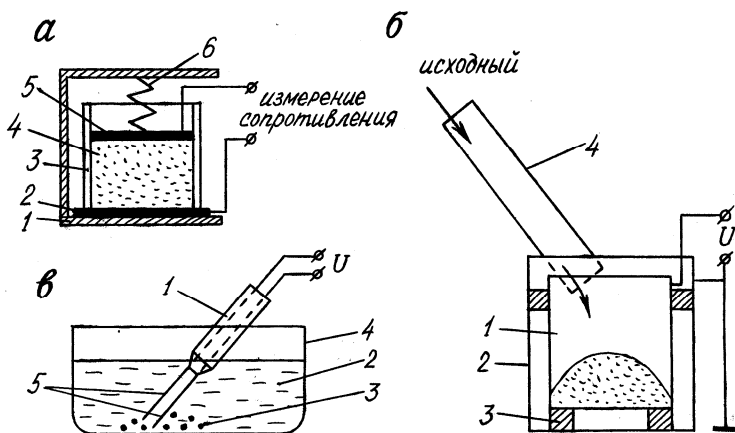


Рис. 7.1. Установки для измерения электрических свойств минералов:
а – прибор для измерения электрического сопротивления: 1 – корпус; 2 – нижний электрод; 3 – стеклянная трубка; 4 – образец; 5 – верхний электрод; 6 – пружина; *б* – установка для измерения величины заряда (трибозаряда): 1 – цилиндр Фарадея; 2 – заземлённый корпус; 3 – изоляторы; 4 – трубка (подложка); *в* – установка для определения диэлектрической проницаемости иглочным методом: 1 – ручка; 2 – жидкий диэлектрик; 3 – частицы минерала; 4 – стеклянная чашка; 5 – иглочатые электроды

Имеются приборы с подогревом диспергированной пробы (для изучения влияния температуры образца на сопротивление) и с изменением давления на пробу, путём установки на верхний электрод дополнительных грузов.

Электрическое сопротивление (проводимость) диспергированных проб зависит от многих факторов, например влажности частиц, температуры, пористости, гранулометрического состава, формы, поэтому влияние данных факторов необходимо изучать и учитывать при измерениях.

Измерение электрических зарядов частиц

При исследованиях электрических свойств минералов можно определять заряды как отдельных частиц, так и суммарные заряды определённого количества частиц. В практике наибольшее распространение получил *интегральный способ* определения суммарных зарядов частиц.

Установка для определения суммарного заряда частиц исследуемого материала (рис. 7.1, б) состоит из цилиндра (клетки) Фарадея 1, соединённого с электростатическим высокоомным вольтметром. Цилиндр Фарадея экранируется заземлённым корпусом 2, в котором он крепится с помощью изоляторов 3.

Измерение суммарного заряда производится путём помещения пробы заряженных частиц в цилиндр Фарадея и снятия показаний с электростатического вольтметра. Если определяется величина трибозаряда частиц, то исходный продукт подают в цилиндр Фарадея по специальной трубке (подложке) 4 (см. рис. 7.1, б).

Удельный заряд частиц (отнесённый к единице массы) определяется по выражению, Кл/кг:

$$q = Q/m = CU/m, \quad (7.20)$$

где Q – суммарный заряд пробы, Кл; m – масса пробы, кг; C – ёмкость измерительной системы, Ф; U – напряжение (показание вольтметра), В.

Знак заряда исследуемого материала определяют следующим образом. Цилиндр Фарадея заряжают зарядом известного знака, затем засыпают в него пробу заряженных частиц. Если показания вольтметра увеличатся, то исследуемый материал имеет одноимённый знак заряда с известным зарядом. Если показания вольтметра уменьшатся, то знак заряда исследуемой пробы противоположный.

Определение диэлектрической проницаемости минералов

Диэлектрическая проницаемость минералов зависит от влажности и температуры образца. Поэтому для точных измерений требуется тщательная сушка пробы (образца).

Диэлектрическую проницаемость крупных образцов минералов определяют *с помощью конденсатора*. Из образца выпиливают пластинку, равную по площади пластинам измерительного конденсатора (обычно 50 x 50 x 5 мм). Сначала измеряют ёмкость конденсатора на воздухе без образца (обычно она известна). Затем определяют ёмкость конденсатора с зажатым между его обкладками образцом. Ёмкость измерительного конденсатора без образца

$$C_в = \epsilon_в \epsilon_0 S / \Delta. \quad (7.21)$$

Ёмкость измерительного конденсатора с образцом, помещённым между обкладками конденсатора:

$$C_{\text{обр}} = \epsilon_{\text{обр}} \epsilon_0 S / \Delta, \quad (7.22)$$

где ϵ_0 , $\epsilon_{\text{в}}$, $\epsilon_{\text{обр}}$ - диэлектрические проницаемости соответственно вакуума, воздуха и образца; S - площадь обкладок конденсатора, м^2 ; Δ - расстояние между обкладками конденсатора (высота образца), м.

При $\epsilon_{\text{в}}=1$ отношение ёмкостей измерительного конденсатора с образцом и без образца определяет диэлектрическую проницаемость образца:

$$\epsilon_{\text{обр}} = C_{\text{обр}} / C_{\text{в}}. \quad (7.23)$$

Для измерения диэлектрической проницаемости мелких частиц можно применять *иглочный метод*, при котором осуществляется наблюдение за поведением частиц исследуемого минерала в среде жидкого диэлектрика в неоднородном электрическом поле.

Если диэлектрическая проницаемость частиц выше диэлектрической проницаемости жидкого диэлектрика, то под действием пондеромоторной электрической силы частицы втянутся в участки электрического поля с большей напряжённостью (притянутся к иглам-электродам). Если диэлектрическая проницаемость частиц ниже диэлектрической проницаемости жидкого диэлектрика, то под действием пондеромоторной электрической силы частицы вытолкнутся в участки электрического поля с меньшей напряжённостью (оттолкнутся от игл-электродов). При равенстве диэлектрических проницаемостей частиц и среды пондеромоторная сила становится равной нулю и движение частиц минералов прекращается.

Установка для определения диэлектрической проницаемости (рис. 7.1, в) состоит из стеклянной чашки 4, в которую заливают жидкий диэлектрик 2 и засыпают частицы 3 исследуемого тонкоизмельчённого минерала (~10 мг). К частицам подводят игольчатые электроды 5, закреплённые в изолированной ручке 1 и подсоединённые к источнику напряжения, и наблюдают поведение частиц в межэлектродном пространстве.

Если частицы притягиваются к иглам-электродам, то добавляют жидкий диэлектрик с большей диэлектрической проницаемостью, например метиловый спирт ($\epsilon=33,7$), и тщательно перемешивают.

вают раствор. Если частицы отталкиваются от игл-электродов, то добавляют жидкий диэлектрик с меньшей диэлектрической проницаемостью, например четырёххлористый углерод ($\epsilon=2,24$). При достижении равенства диэлектрических проницаемостей смеси жидких диэлектриков и минерала поведение частиц становится неопределённым. При достижении неопределённого поведения частиц диэлектрическую проницаемость жидкости, а следовательно, и вносимого в неё минерала определяют по формуле

$$\epsilon_m = (\epsilon_1 V_1 + \epsilon_2 V_2) / (V_1 + V_2), \quad (7.24)$$

где ϵ_m , ϵ_1 , ϵ_2 – диэлектрические проницаемости соответственно минерала и жидких диэлектриков смеси; V_1 , V_2 – объёмы жидких диэлектриков в смеси, мл.

Точность определения диэлектрической проницаемости иглочным методом достигает десятых долей единицы.

8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ И КОНСТРУКЦИИ СЕПАРАТОРОВ

8.1. Электростатическая сепарация

При электростатической сепарации осуществляется разделение частиц минералов по электрической проводимости. При этом способе исходный продукт делится на проводники, полупроводники и диэлектрики.

Электростатический способ сепарации предусматривает проведение следующих технологических операций: подготовка материала к обогащению, сообщение селективного заряда частицам и разделение их в электрическом поле. В чисто электростатических сепараторах операция сообщения заряда частицам совмещается с операцией разделения.

Наибольшее распространение при обогащении полезных ископаемых получила *собственно электростатическая сепарация* и *трибоэлектростатическая сепарация* (сообщение заряда путём трибоэлектризации предшествует операции разделения). Известна также *флюидизационно-электростатическая сепарация* (сообщение

заряда в кипящем слое) и *пироэлектростатическая сепарация* (собщение заряда путём нагрева).

По конструктивному исполнению основного элемента – электрода - электростатические сепараторы делятся на барабанные, камерные и пластинчатые. Сепараторы любой конструкции могут выполняться из нескольких однотипных узлов, располагаемых каскадно. Основные конструкции электростатических сепараторов приведены на рис. 8.1.

Барабанный электростатический сепаратор (рис. 8.1, а) состоит из питателя 1, вращающегося заземлённого барабана-электрода 2, отклоняющего изолированного электрода 3, трубчатой формы, источника высокого напряжения 4, щётки 5 для очистки барабана, шиберов 6 для регулирования качества и количества продуктов разделения и приёмников продуктов разделения 7.

Исходный материал с помощью питателя равномерным слоем подаётся на барабан-электрод. Частицы-проводники получают от барабана положительный заряд очень быстро и отталкиваются от барабана («+» от «+») и попадают в приёмник проводниковой фракции. Для большего отклонения частиц-проводников от барабана применяют отклоняющий отрицательный электрод, к которому стремятся притянуться частицы-проводники. Частицы-диэлектрики за время нахождения на барабане-электроде не успевают получить существенный заряд и не отталкиваются от барабана. Кроме того, частицы-диэлектрики поляризуются в электростатическом поле и притягиваются к барабану. Для очистки барабана от частиц-диэлектриков применяется вращающаяся щётка. Частицы с промежуточными электрическими свойствами попадают в приёмник промпродуктовой фракции.

Первые электростатические барабанные сепараторы, например сепаратор Блека и Мошера, имели изолированные отрицательные барабаны-электроды и не имели дополнительного отклоняющего электрода. Впоследствии по условиям безопасности барабаны-электроды стали заземлять и применять отклоняющие электроды для повышения технологических показателей разделения.

Камерный электростатический сепаратор с вертикально расположенными электродами (рис.8.1, б) состоит из бункера пита-

теля 1, двух заземлённых положительных электродов-пластин 3, между которыми установлен центральный изолированный отрицательный электрод-пластина 2.

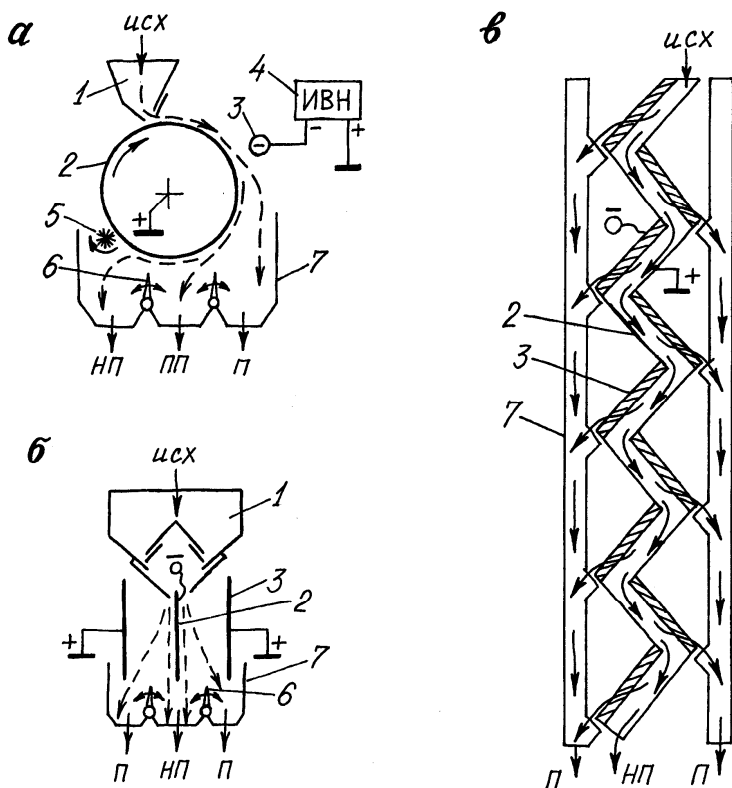


Рис. 8.1. Схемы электростатических сепараторов:

а – барабанный сепаратор; *б* – камерный с вертикально расположенными электродами-пластинами; *в* – каскадный пластинчатый сепаратор

1 – бункер-питатель; 2 – зарядный электрод (барабан, пластина); 3 – отклоняющий электрод (труба, прут, пластина, перфорированная жалюзиобразная пластина); 4 – источник высокого напряжения; 5 – щётка; 6 – шиббер; 7 – приёмники продуктов разделения

п – проводники; нп – непроводники (диэлектрики); пп – промежуточный продукт

Исходный материал с помощью питателя 1 равномерным слоем подаётся на зарядную пластину-электрод 2 с обеих её плоскостей. Частицы-проводники очень быстро заряжаются и отталкиваются от зарядного электрода («-» от «-»). Большое отклонение частиц-проводников достигается с помощью боковых электродов 3, так как частицы-проводники стремятся притянуться к ним («-» к «+»). Частицы-диэлектрики не успевают получить существенный заряд от электрода 2, поляризуются и скользят по нему вниз, попадая в свой приёмник. Для регулирования качества и количества продуктов разделения используются шиберы 6.

Тонкодисперсные частицы непроводников вследствие адгезионного эффекта и явления поляризации закрепляются на электроде 2 и ухудшают процесс сепарации. Встряхивание электрода не приводит к его очистке, поэтому в сепараторах с пластинчатыми электродами обогащают обеспыленный узкокласифицированный продукт.

Каскадный пластинчатый электростатический сепаратор (конструкции А. П. Ковалёва) содержит 16 однотипных каскадов, установленных зигзагообразно. На рис. 8.1, в приведена схема этого сепаратора (показаны девять каскадов). Каждый из каскадов сепаратора состоит из нижнего заземлённого положительного гладкого пластинчатого электрода 2 и верхнего изолированного отрицательного жалюзиобразного электрода 3, выполненного в виде наклонных пластин. Угол наклона электродов составляет около 50° .

Частицы-проводники заряжаются на нижнем электроде, отталкиваются от него («+» от «+»), движутся к верхнему электроду («+» к «-»), проходят через зазор между наклонными пластинами и собираются в приёмник 7. Частицы-проводники, не прошедшие сквозь верхний электрод, попадают на нижний электрод следующего каскада, где процесс их зарядки продолжается. Частицы-непроводники движутся по зигзагообразно установленным электродам (нижним), пока не попадут в свой приёмник.

Транспортирование материала по наклонным пластинчатым электродам имеет ряд особенностей, связанных с возможностью получения частицами-диэлектриками значительных трибозарядов из-за трения частиц друг о друга и о поверхность электрода, что может значительно ухудшить показатели обогащения.

8.2. Трибоэлектростатическая сепарация

При трибоэлектростатической сепарации осуществляется разделение частиц минералов, получивших в результате трибоэлектризации положительный и отрицательный заряды. Трибоэлектростатическую сепарацию применяют для разделения минералов-диэлектриков.

Главной отличительной особенностью трибоэлектростатических сепараторов от собственно электростатических является разделение операций сообщения заряда (первая операция) и разделения частиц (вторая операция).

Для трибоэлектризации (зарядки) частиц исходного материала чаще используют контакт частиц со специальными поверхностями (подложками), по которым частицы движутся в зону разделения, получая трибозаряд.

На результаты трибоэлектризации частиц оказывают влияние свойства разделяемых минералов, скорость и характер движения частиц по подложке, её свойства и наличие заземления подложки. Если подложка изолирована от земли, то на ней скапливаются трибозаряды, нарушая процесс зарядки частиц, поэтому трибоповерхности обычно заземляют. При использовании неэлектропроводных материалов для изготовления подложки над ней на некотором расстоянии устанавливают подогреваемую проволочную сетку для снятия свободных зарядов.

Обычно для изготовления подложек (поверхностей) используют медь, алюминий, различные марки сталей, оцинкованное и лужёное железо, стекло, текстолит, пластмассы и другие материалы. При прочих равных условиях предпочтение отдаётся электропроводным материалам.

Одним из факторов, препятствующих применению трибоэлектростатической сепарации, является нивелировка свойств разделяемых минералов вследствие закрепления на их поверхности тонкодисперсных частиц и образования однородных плёнок. Эффективным средством в этом случае является предварительная очистка поверхности оттиркой или химическим растворением плёнок с последующим обеспыливанием. Нагрев как минералов, так и подложки

может привести к изменению знака и величины трибозарядов минералов.

Трибозарядка о подложку может произойти при скатывании частиц под действием силы тяжести при вибро- или пневмотранспортировании. Трибоэлектростатические сепараторы подразделяются на барабанные и камерные, схемы которых приведены на рис. 8.2.

Трибоэлектростатический барабанный сепаратор (см. рис. 8.2, а) состоит из бункера-питателя 1, наклонной пластины 2, вращающихся барабанов-электродов 3 и 4, щётки для очистки барабанов 5, шиберы 6 и приёмников продуктов разделения 7.

Исходный материал с помощью бункера-питателя 1 равномерным слоем подается на пластину (подложку) 2, где частицы одних минералов получают положительный заряд, а частицы других – отрицательный. При попадании частиц с отрицательным зарядом на положительный барабан 4 они притянутся к барабану («-» к «+») и будут транспортироваться последним в свой приёмник. При попадании частиц с положительным зарядом на положительный барабан 4 они оттолкнутся от барабана 4 («+» от «+») и притянутся к барабану 3 («+» к «-») и попадут в свой приёмник.

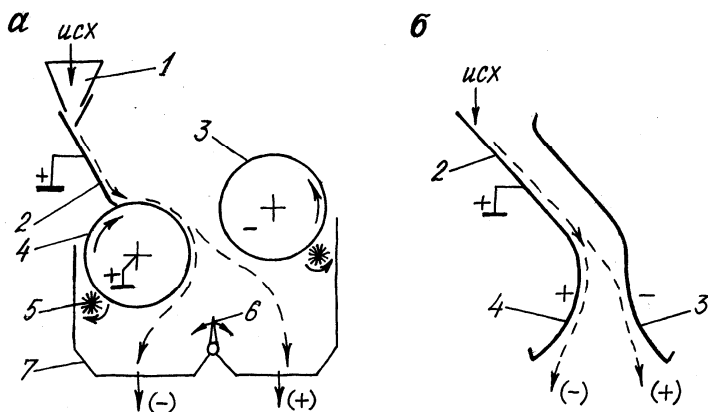


Рис. 8.2. Схемы трибоэлектростатических сепараторов:
 а – барабанный; б – камерный с пластинчатыми электродами;
 1 – бункер-питатель; 2 – наклонная пластина (подложка); 3 и 4 – электроды (барабаны, пластины специального профиля); 5 – щётка; 6 – шибер; 7 – приёмники продуктов разделения
 (-) – частицы с отрицательным зарядом; (+) – частицы с положительным зарядом

Трибоэлектростатический камерный сепаратор с пластинчатыми электродами (см. рис. 8.2, б) состоит из наклонной плоскости 2 с вибрацией или без таковой, на которую подаётся из питателя исходный материал. Получившие трибозаряд на плоскости 2 частицы попадают в камеру разделения, образованную двумя электродами 3 и 4 специального профиля. Частицы с положительным зарядом притягиваются к отрицательному электроду 3, частицы с отрицательным зарядом - к положительному электроду 4.

8.3. Сепарация в поле коронного разряда

При сепарации в поле коронного разряда осуществляется разделение частиц в основном по электрической проводимости и по крупности. При этом способе исходный материал делится на проводники, полупроводники и диэлектрики или на грубозернистую и тонкозернистую фракции. Коронный способ сепарации применяется для обогащения, классификации и обеспыливания полезных ископаемых и других продуктов.

Общим для этих процессов является использование поля коронного разряда для сообщения зарядов разделяемым компонентам. Поле коронного разряда является весьма неоднородным. Если подвести напряжение к игольчатому и плоскому электроду, то перед искровым разрядом возникнет коронный разряд. Коронный разряд (корона) быстрее образуется у электрода с меньшим радиусом кривизны (проволока, иглы и др.), поэтому этот электрод называют коронирующим (КЭ).

Начальная напряжённость поля E_k (В/м) системы провод-плоскость зависит от радиуса провода КЭ и относительной плотности воздуха (при давлении 100 кПа и температуре 25 °С, $\rho_b=1,23$ кг/м³) и определяется по эмпирической формуле Пике

$$E_k = 31\rho_b (1 + 0,308/\sqrt[3]{\rho_b r_b}), \quad (8.1)$$

где r_b – радиус коронирующего электрода, мм.

Напряжение зажигания короны U_k , В

$$U_k = E_k r_b \ln(2h/r_b), \quad (8.2)$$

где h – расстояние между проводом и плоскостью, м.

Ток коронного разряда I_k (А) для указанного случая определяется по формуле

$$I_k = \frac{0,78kU(U - U_k)}{r_3^2 \ln(2h/r_3)}, \quad (8.3)$$

где k – коэффициент пропорциональности; U – напряжение на коронирующем проводе, В.

Коронный разряд – это незавершённый пробой воздушного промежутка. Для коронного разряда характерна ионизация воздуха только у коронирующего электрода. При ионизации воздуха ионы противоположного знака с коронирующим электродом движутся к нему и отдают свой заряд. Ионы одинакового знака с коронирующим электродом движутся к противоположному электроду с большим радиусом кривизны и осаждаются на нём, заряжая частицы, находящиеся в межэлектродном пространстве. Электрод с большим радиусом кривизны называется *осадительным*.

В зависимости от полярности приложенного напряжения выделяют *положительную* и *отрицательную* короны. Положительная корона представляет собой бледно-голубое свечение газа вокруг коронирующего электрода. Отрицательная корона проявляется в виде отдельных светящихся точек.

Пробивное напряжение между электродами при отрицательной короне существенно выше, чем при положительной. Поэтому в практике применения коронного способа разделения применяют отрицательную корону.

Коронные сепараторы бывают пластинчатые, барабанные, камерные, ленточные и трубчатые. Наибольшее распространение получили камерные и барабанные сепараторы. Электрические фильтры, применяющиеся для обеспыливания воздуха, по своей сути являются коронными сепараторами.

Конструкции барабанного коронно-электростатического и камерного коронного сепараторов приведены на рис. 8.3.

Барабанный коронно-электростатический сепаратор (см. рис. 8.3, а) состоит из питателя 1, изолированного коронирующего электрода 2, вращающегося заземлённого барабана-электрода 3, источника высокого напряжения 4, корпуса 5, щетки 6 для очистки ба-

рабана, шиберов 7 для регулирования качества и количества продуктов разделения и отклоняющего изолированного электрода 8.

Исходный материал с помощью питателя равномерным слоем подаётся на вращающийся барабан-электрод, который транспортирует материал в межэлектродное пространство. Отрицательные ионы воздуха движутся от коронирующего отрицательного электрода к противоположному, положительному, электроду-барабану и заряжают все частицы исходного материала (и проводники, и непроводники) отрицательным зарядом, величина которого (удельная) обратно пропорционально зависит от крупности и плотности частиц.

В дальнейшем, при выходе частиц из межэлектродного пространства, осуществляется их селективная разрядка на барабане-электроде. Частицы-диэлектрики будут разряжаться на барабане очень медленно и притянутся к нему («-» к «+»). Для очистки барабана от частиц-непроводников применяется вращающаяся щётка.

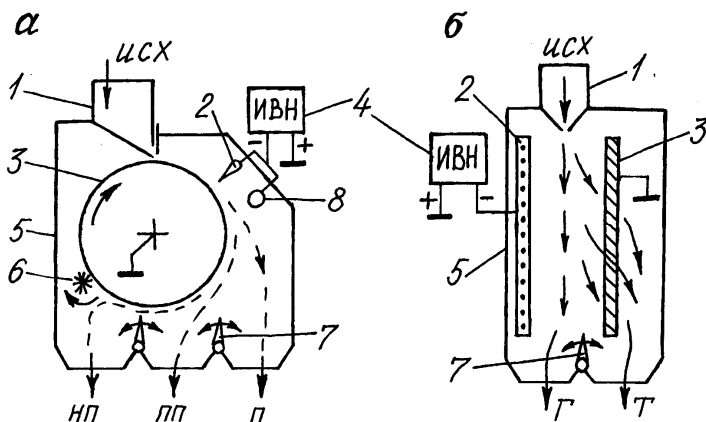


Рис. 8.3. Схемы коронных сепараторов:

а – барабанный коронно-электростатический; б – камерный;

1 – бункер-питатель; 2 – коронирующий электрод; 3 – осадительный электрод; 4 – источник высокого напряжения; 5 – корпус; б – щётка; 7 – шибер; 8 – отклоняющий электрод;

п – проводники; нп – непроводники; пп – промежуточный продукт; г – грубозернистая фракция; т – тонкозернистая фракция

Частицы-проводники очень быстро разрядятся на заземлённом барабане и также очень быстро получают от барабана положительный заряд и оттолкнутся от барабана («+» от «+»). Для большего отклонения частиц-проводников часто применяют отклоняющий электрод, к которому при движении стремятся притянуться частицы-проводники. Частицы с промежуточными электрическими свойствами попадают в приёмник промпродуктовой фракции.

При наличии дополнительного отклоняющего электрода барабанный сепаратор называется коронно-электростатическим, при отсутствии отклоняющего электрода – коронным.

В барабанном коронном (коронно-электростатическом) сепараторе осуществляется разделение частиц по электрической проводимости. Повышенная влажность исходного материала нивелирует электрические свойства разделяемых минералов, поэтому для исключения этого явления барабаны сепараторов часто подогревают с помощью теплоэлектронагревателей.

Камерный коронный сепаратор (см. рис. 8.3, б) состоит из питателя 1, изолированного отрицательного коронирующего электрода 2 и заземлённого положительного осадительного 3 электродов, источника высокого напряжения 4, корпуса 5 и шибера 7 для регулирования качества и количества продуктов разделения.

Камера сепаратора образована коронирующим и осадительным электродами, выполненными в виде рамок. В рамке коронирующего электрода монтируется ряд проволок небольшого диаметра или трубок со вставленными в них лезвиями. В рамке осадительного электрода наклонно установлены проводящие пластины (жалюзи).

В камерных сепараторах осуществляется разделение по крупности (обеспыливание и классификация) однородных по составу продуктов. Исходный продукт с помощью питателя подаётся в камеру сепаратора. Частицы материала, двигаясь под действием гравитационных сил мимо коронирующего электрода, получают от него отрицательный заряд. Более крупные частицы получают небольшой по величине удельный заряд (отнесённый к единице массы), практически не изменяют своей траектории движения и попадают в приёмник для грубозернистой фракции. Более мелкие частицы получают высокий удельный заряд и отталкиваются от коронирующего элект-

трода («-» от «-») и стремятся притянуться к осадительному электроду («-» к «+»). В результате этого мелкие частицы изменяют свою траекторию движения и попадают в приёмник для тонкозернистой фракции. Часть мелких частиц проходят между отверстиями наклонно установленных пластин осадительного электрода и также попадают в приёмник для тонкозернистой фракции.

8.4. Трибоадгезионная сепарация

При трибоадгезионной сепарации осуществляется разделение однородных по минеральному составу частиц по крупности (обеспыливание и классификация). Процесс трибоадгезионной сепарации предложил в 1952 г. Олофинский Н. Ф., при котором «вредное» свойство прилипания мелких частиц к электродам и сцепление частиц друг с другом под действием сил адгезии использовано для разделения по крупности.

Барабанный трибоадгезионный сепаратор (рис. 8.4, а) состоит из питателя 1, вибрототка 2, изолированного барабана 3, щётки 4 для очистки барабана, шибера 5 для регулирования качества и количества продуктов разделения и корпуса 6.

В этом сепараторе силой, притягивающей частицы к барабану, является сила адгезии, а силой, отталкивающей частицы от барабана, – центробежная (сила тяжести не рассматривается, так как действует в одном направлении на частицы). Сила адгезии, по Дерягину Б. В., состоит из молекулярной и электрической сил. Причём большую роль в формировании электрической составляющей силы адгезии играют кулоновская сила зеркального отображения, если частица предварительно заряжена (имеет остаточный заряд).

Частицы исходного продукта с помощью питателя подаются на виброплоскость, где они получают трибозаряд, причем чем меньше размер частицы, тем больший удельный заряд она получит. Далее, заряженные частицы попадают на вращающийся изолированный барабан. На более крупные частицы центробежная сила действует сильнее, и сила притяжения крупных частиц к барабану за счет силы адгезии низка (как молекулярная, так и электрическая зеркального отображения), поэтому крупные частицы оторвутся от ба-

рабана раньше и попадут в приёмник грубозернистой фракции. На более мелкие частицы центробежная сила действует в меньшей степени, и сила притяжения мелких частиц к барабану за счет силы адгезии более высока, поэтому мелкие частицы притянутся к барабану и попадут в приёмник тонкозернистой фракции.

При значительных зарядах (остаточных) электрические силы адгезии превышают молекулярные, и это обстоятельство позволяет расширить диапазон использования трибоадгезионной сепарации по максимальной крупности материала до 5 мм.

Основным способом предварительной зарядки частиц при трибоадгезионной сепарации является трибоэлектризация, хотя можно применить и контактный способ, и зарядку в поле коронного разряда. Поэтому более точным названием этого процесса было бы *электроадгезионная сепарация* [5].

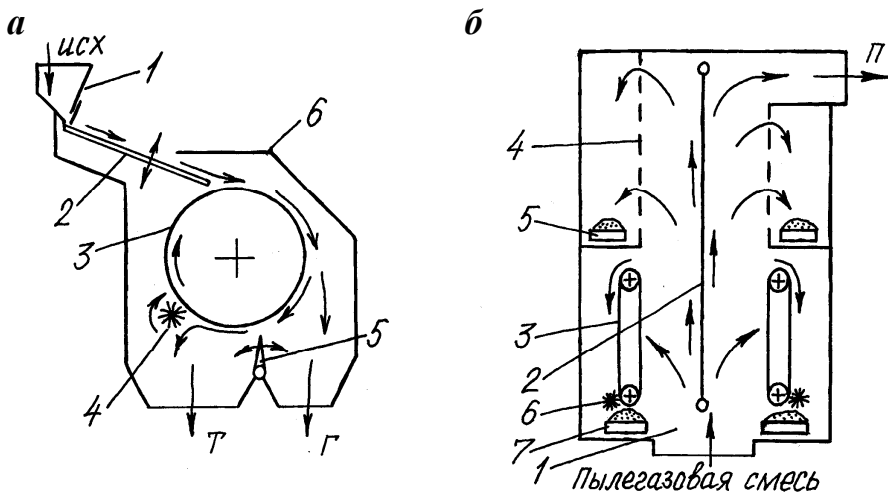


Рис. 8.4. Схемы трибоадгезионного барабанного (а) и пневмоэлектрического (б) сепараторов:

а – барабанный трибоадгезионный сепаратор: 1 – бункер-питатель; 2 – виброток; 3 – вращающийся барабан; 4 – щетка; 5 – шибер; 6 – корпус; б – пневмоэлектрический сепаратор с комбинированным осадительным электродом: 1 – рабочая камера; 2 – коронирующий электрод; 3 – осадительный электрод (конвейер); 4 – перфорированный осадительный электрод; 5, 7 – конвейеры для разгрузки непроводниковой фракции; 6 – щетка

8.5. Пневмоэлектрическая сепарация

При пневмоэлектрической сепарации используется разделение частиц в электрических полях при транспортировании исходного материала воздушным потоком. Пневмоэлектрические сепараторы используются для обогащения тонкодисперсных материалов.

При пневмоэлектрической сепарации сообщение заряда частицам осуществляется в поле коронного разряда, контактным способом и трибоэлектризацией. Известны несколько конструкций пневмоэлектрических сепараторов. Рассмотрим принцип разделения при пневмоэлектрической сепарации на примере сепаратора с комбинированным осадительным электродом.

Пневмоэлектрический сепаратор с комбинированным осадительным электродом (см. рис. 8.4, б) состоит из рабочей камеры 1, коронирующего центрального электрода 2, двух нижних осадительных электродов (конвейеров) 3, двух верхних перфорированных осадительных электродов 4, двух верхних 5 и двух нижних 7 конвейеров для разгрузки непроводниковой фракции, щеток 6 для очистки нижних осадительных электродов (конвейеров). Электрод 2 изолирован от земли, а электроды 3 и 4 заземлены.

Исходная смесь транспортируется потоком воздуха через камеру сепаратора. Все частицы (проводники и непроводники) получают отрицательный заряд в поле короны и отталкиваются от коронирующего электрода («-» от «-»). Более мелкие частицы-непроводники, получившие больший удельный заряд, притягиваются к электродам-конвейерам 3 и разгружаются конвейерами 7 в сборник непроводниковой фракции. Более крупные частицы-непроводники, получившие меньший удельный заряд, поднимаются вверх по камере сепаратора и притягиваются к электродам 4, проходят через перфорации и разгружаются конвейерами 5 в приёмник непроводниковой фракции.

Частицы-проводники после контакта с осадительными электродами 3 и 4 перезаряжаются, получают положительный заряд и отталкиваются от осадительных электродов и увлекаются потоком воздуха в верхнюю часть сепаратора, где они разгружаются в приёмник проводниковой фракции.

Скорость движения воздушного потока в сепараторе относительно невелика, но она должна быть больше скоростей витания самых крупных частиц.

8.6. Диэлектрическая сепарация

При диэлектрической сепарации осуществляется разделение частиц минералов по диэлектрической проницаемости. При этом способе исходный продукт делится на частицы с большим и меньшим значением диэлектрической проницаемости.

Диэлектрическая сепарация – это единственный метод электрического обогащения, не требующий сообщения заряда разделяемым частицам. Диэлектрическая сепарация осуществляется, как правило, в среде жидкого диэлектрика, диэлектрическая проницаемость которого должна быть больше, чем у одного минерала, но меньше, чем у другого.

Разделение частиц исходного продукта при диэлектрической сепарации происходит под действием пондеромоторной электрической силы (формула (7.7)) в сильно неоднородных электрических полях ($\text{grad}E \neq 0$). Если диэлектрическая проницаемость частицы (ϵ_q) больше диэлектрической проницаемости среды (ϵ_c), то пондеромоторная сила положительна и стремится втянуть частицу в участки поля с большей напряжённостью. При $\epsilon_q < \epsilon_c$ пондеромоторная сила отрицательна и выталкивает частицу в более слабые участки электрического поля.

Использование жидкого диэлектрика, малые значения пондеромоторных сил, высокие требования к гранулометрическому составу и шкале классификации препятствуют широкому распространению диэлектрической сепарации в промышленности.

Диэлектрический лабораторный сепаратор ДСК разработан для получения мономинеральных фракций. Сепаратор (рис. 8.5, а) состоит из ванны (кюветы) 1, заполненной жидким диэлектриком, сферического 2 и плоского 3 электродов. Электроды подключаются к источнику переменного напряжения (до 3 кВ). Для исключения пробоя между электродами при разделении проводящих частиц сферический электрод изолируют плёнкой целлофана.

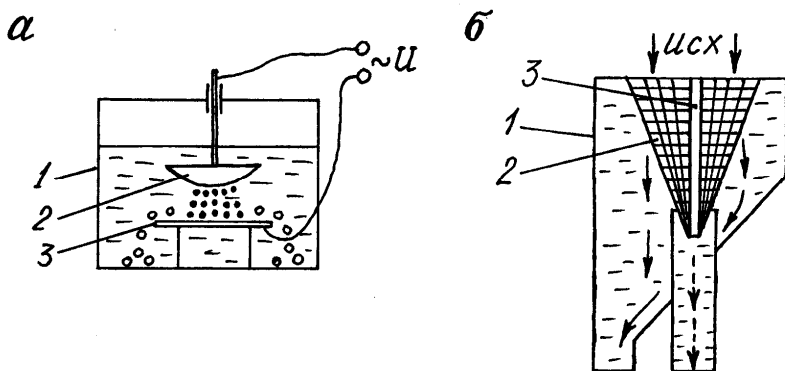


Рис. 8.5. Схемы диэлектрических сепараторов:
а – лабораторный сепаратор ДСК; *б* – сепаратор с коническим электродом
 1 – ванна (кювета); 2 – электрод с меньшим радиусом кривизны; 3 – электрод с
 большим радиусом кривизны
 —► траектория движения частиц с $\epsilon_{\text{ч}} < \epsilon_{\text{с}}$; ---► траектория движения частиц с $\epsilon_{\text{ч}} > \epsilon_{\text{с}}$

Разделяемый материал массой 1 г помещается на плоский электрод и вместе с ним опускается в кювету, заполненную жидким диэлектриком. Сверху устанавливается сферический электрод, положение которого по вертикали можно регулировать при помощи микрометрического винта, изменяя межэлектродное расстояние. При подаче напряжения на электроды в межэлектродной зоне устанавливается неоднородное электрическое поле, максимальное в центре. Частицы с $\epsilon_{\text{ч}} > \epsilon_{\text{с}}$ смещаются к центру электродной пары и образуют между электродами «цепочки» (эти частицы показаны чёрным цветом на рис. 8.5, *а*). Частицы с $\epsilon_{\text{ч}} < \epsilon_{\text{с}}$ выталкиваются в более слабые участки электрического поля, смещаются к периферии плоского электрода и падают с него (эти частицы показаны белым цветом на рис. 8.5, *а*). По окончании сепарации вручную извлекают продукты разделения. Пондеромоторную силу увеличивают путём уменьшения зазора между электродами и увеличения рабочего напряжения.

Диэлектрический сепаратор с коническим электродом (рис. 8.5, *б*) состоит из рабочей ванны 1, заполненной жидким диэлектриком, проволочного конического электрода 2 и центрального цилиндрического электрода 3. Проволочный каркас конического электрода

да покрывается слоем диэлектрика и изготавливается из проволоки диаметром 0,3-0,4 мм при частоте установки колец пять штук на сантиметр и четыре проволоки на сантиметр по образующей конуса.

Загрузка сепарируемого материала осуществляется кольцевым питателем. Частицы с $\epsilon_a < \epsilon_c$ проходят сквозь сетчатый конус-электрод и, не изменяя первоначальной траектории, поступают в свой приёмник. Частицы с $\epsilon_a > \epsilon_c$ втягиваются внутрь конуса, движутся к его вершине и разгружаются в свой приёмник. С одним конусом-электродом производительность сепаратора достигает 15 кг/ч. Введение нескольких конусов позволяет достичь хорошего качества разделения при производительности до 200 кг/ч. Дополнительные конические электроды устанавливаются концентрично относительно друг друга на расстоянии 6 мм при высоте внутреннего конуса 20 см, а внешнего – 40 см.

Известны конструкции диэлектрических сепараторов для разделения в воздушной среде. Сепарация в воздушной среде затруднена тем, что пондеромоторная сила, действующая на частицы, для всех минералов положительна, хотя и имеет различную величину.

9. ПРАКТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОГАЩЕНИЯ

9.1. Подготовка материала к электрическому обогащению

К основным подготовительным операциям перед электрическим обогащением относятся операции классификации и обеспыливания, регулирования влажности исходного материала и среды, очистки поверхностей разделяемых минералов от плёнок и операции целенаправленного селективного изменения свойств разделяемых минералов.

Классификация и обеспыливание. Необходимость проведения операции классификации обусловлена тем, что эффективность большинства процессов электрической сепарации зависит от удельного заряда, приходящегося на единицу массы. Разброс размеров частиц приводит к взаимозагрязнению продуктов разделения.

Верхняя граница по крупности разделяемых зёрен минералов составляет 3-5 мм, нижняя – на уровне 0,1 мм. Для процессов пнев-

мозлектрической сепарации возможно обогащение классов – 0,25+0,01 мм. Желательно весь диапазон размеров зёрен исходного продукта разделить на классы, например –3+2; -2+1; -1+0,5; -0,5+0,1 мм, и отдельно проводить электрическую сепарацию каждого класса крупности.

Отрицательное влияние на процесс сепарации оказывает наличие пыли в исходном материале. Тонкодисперсные частицы закрепляются на более крупных частицах, покрывают их поверхность и нивелируют электрические свойства. Кроме того, частицы пыли закрепляются на осадительных электродах, осложняя процесс перезарядки частиц-проводников. Большое количество пыли в исходном продукте приводит к взаимозагрязнению продуктов разделения пылью и частицами с электрическими свойствами, изменёнными налипшей пылью.

Операции обеспыливания и классификации материала могут осуществляться в воздушной среде. Обеспыливание и классификацию можно осуществлять в коронных камерных сепараторах, обеспечивающих более высокие результаты по сравнению с традиционными методами. Высокие показатели обеспыливания достигаются при трибоадгезионной сепарации.

В отдельных методах электрической сепарации высоких показателей можно достичь и без тщательной предварительной классификации. К таким методам можно отнести трибоэлектростатическую сепарацию, при которой разделяемые частицы получают заряды противоположного знака и движутся впоследствии в разные стороны. Однако предварительная классификация исходного материала перед трибоэлектростатической сепарацией может и улучшить результаты разделения, так как получаемый частицами при трибоэлектризации заряд зависит от крупности частиц.

Регулирование влажности исходного материала и среды. Электрическая проводимость является функцией объёмного и поверхностного сопротивления. Вода, закрепляясь на поверхности частицы, снижает поверхностное сопротивление частицы и повышает её электрическую проводимость. Влияние влаги больше будет сказываться на электрической проводимости диэлектрика, значительно повышая её.

При подготовке материала по влажности необходимо удалить капиллярную и плёночную или только плёночную влагу со всей поверхности частиц или только в точке контакта частицы с рабочими электродами сепаратора. В зависимости от вида удаляемой влаги, места её удаления назначают способ, температуру и длительность сушки. При удалении влаги в точке контакта частицы с электродом (барабаном) в последний встраиваются электротеплонагреватели. При контакте частицы с разогретым барабаном происходит испарение влаги и снижение поверхностного сопротивления частицы.

При необходимости удаления влаги со всей поверхности частиц сушку производят с помощью встроенных в элементы сепаратора теплонагревателей или в отдельном аппарате (трубах-сушилках, барабанных сушилках, печах кипящего слоя).

Очистка поверхностей минералов от плёнок. Если поверхность разделяемых минералов покрыта пленкой, например оксидом железа, то электрические свойства проводников и диэлектриков могут нивелироваться. Очистку поверхностей минералов от плёнок производят с помощью механического удаления или растворения плёнок в кислотах или щелочах.

Механическая оттирка осуществляется в водной или воздушной средах в оттирочных аппаратах или с применением измельчительного оборудования при специальных режимах работы. Шламы удаляются путём гидравлической или воздушной классификации.

Растворение пленок минералов кислых и изверженных горных пород осуществляют с применением серной или соляной кислот при расходах свыше 1 кг/т в зависимости от толщины плёнок. Минералы, загрязнённые соединениями железа, очищают серной кислотой или гидросульфитом железа.

Селективное изменение свойств разделяемых минералов применяют в случаях, когда разделяемые минералы не имеют различий в электрических свойствах или когда различия в свойствах невелики. Основными способами селективного изменения электрических свойств являются термическое воздействие и обработка реагентами.

Термообработка некоторых минералов (касситерит, барит, кварц и др.) после длительного подогрева в интервале температур до 800 °С приводит к необратимым изменениям электропроводности.

Изменение поверхностной электрической проводимости минералов можно провести с помощью реагентной обработки. Разделяемые минералы при этом селективно изменяют смачиваемость. При этом влага, адсорбируемая минералом из воздуха, изменяет электрическую проводимость минерала. Иногда применяют реагент с повышенной электрической проводимостью, который, закрепляясь на поверхности минерала, изменяет его проводимость.

Об изменении электрических свойств минералов можно судить из следующего примера. Отношение электрических проводимостей пар минералов апатит - циркон и полевой шпат – циркон без обработки реагентами составляет соответственно 0,2 и 1,6. После обработки этих минералов фтористоводородной кислотой это соотношение достигло соответственно 10^4 и 10^3 .

Реагентная обработка производится органическими и неорганическими веществами. Реагентная обработка перед электрической сепарацией проводится в сухом и мокром виде. Сложность процесса реагентной обработки оправдывается хорошими технологическими показателями последующего электрического обогащения.

9.2. Промышленные электрические сепараторы

Отечественной промышленностью выпускаются барабанные электростатические и коронно-электростатические, коронные камерные, трибоэлектростатические барабанные и пластинчатые сепараторы, характеристики которых приведены в табл. 9.1 и 9.2.

Выпускаемые сепараторы состоят из типовых узлов (рамы, питатели, блоки электродов и блоки питания), из которых можно компоновать требуемую технологическую схему. Так, например, из сепараторов СЭС-2000, используя секционный принцип компоновки, можно собрать до 27 различных схем обогащения.

Барабанные коронно-электростатические сепараторы СЭС-1000М, СЭС-2000, СБЭ применяются для обогащения руд и доводки гравитационных концентратов руд и россыпей чёрных, цветных и редких металлов, а также в алмазной, золотодобывающей, стекольной, абразивной, керамической отраслях промышленности. Сепаратор ЭСК-2000 используют для обогащения силвинитовых руд (вы-

деление галита), руд редких и цветных металлов. Камерные коронные сепараторы КМП и КМП-1 предназначены для обеспыливания и классификации различных материалов по крупности.

Барабанные трибоэлектростатические сепараторы СЭП-1 и СЭП-2 предназначены для отделения кварца от полевых шпатов, слюды от кварца и полевых шпатов. Сепараторы СЭП-1 и СЭП-2 отличаются числом секций, komponуемых в параллельные нитки (СЭП-1 содержит шесть секций, а СЭП-2 - восемь). Трибоэлектростатические пластинчатые сепараторы СТЭ разработаны на Верхне-Днепровском горно-металлургическом комбинате и применяются для обогащения горно-химического, керамического, абразивного, оптического и других видов сырья, компоненты которых имеют близкую проводимость.

Источники питания электрических сепараторов.

К электродам электрических сепараторов, за исключением трибоадгезионных, подводится высокое напряжение. Питание осуществляется от источника высокого напряжения с использованием высоковольтной аппаратуры: высоковольтных кабелей, защищённых шинопроводов, конденсаторов, изолирующих элементов (изоляторов), разрядников, устройств измерения и управления.

Одним из основных элементов электрооборудования сепаратора являются источники питания, к которым предъявляются ряд требований: 1) плавное изменение напряжения от 0 до максимально-го; 2) безопасность обслуживания; 3) стабильность напряжения и отсутствие пульсаций; 4) надёжность и длительный срок службы.

В качестве источников высокого напряжения используют выпрямительные установки и электростатические генераторы [5].

9.3. Электрическое обогащение минералов и продуктов

Электрическую сепарацию в технологические схемы включают с целью обеспыливания, классификации и обогащения минерального и другого сырья. Обеспыливание и классификация применяются при переработке однородного сырья. Для этого применяются трибоадгезионные, камерные коронные и барабанные электростатические сепараторы.

Таблица 9.1
Технические характеристики промышленных коронных электрических сепараторов [5]

Параметры	Барабанные				Камерные	
	ЭСК-2000	СЭС-1000М	СЭС-2000	СБЭ	КМП	КМП-1
Производительность по исходному питанию, т/ч	10	1-5	4-20	4	1,2	2-4
Крупность питания, мм	-3+0,074	-1,5+0,074	-1,5+0,074	-4+0,074	-4-0	-5+0
Тип питания	Самотёчный	Валковый	Валковый	Валковый	Самотёчный	Самотёчный
Заземлённый электрод: диаметр, мм	300	150	150	300	-	-
длина, мм	2000	1000	2000	2000	-	-
Частота вращения, мин ⁻¹	50-400	110-250	410;450; 500	50-400	-	-
Диаметр отклоняющего электрода, мм	-	30	30	30	-	-
Расстояние между электродами, мм:						
сверху	0-80	-	-	0-80	100-250	80-200
снизу	-	-	-	-	150-400	80-300
Напряжение на электродах, кВ	50	20	20	60	50	50
Установочная мощность, кВт	1,5	21	21	-	3	4
Габаритные размеры, мм:						
длина	4050	2650	3620	4295	2285	3170
ширина	3650	3370	2020	3400	1922	2180
высота	6560	3850	3950	6630	4456	5500
Масса, т	21,5	18,3	22,7	16,2	2,2	3,8

Таблица 9.2

Технические характеристики промышленных трибоэлектростатических сепараторов [5]

Параметры	Барабанные			Пластинчатый
	СЭП-1	СЭП-2	СЭС-2000С	СТЭ
Производительность по исходному питанию, т/ч	4	4	12	6
Крупность питания, мм	-1+0,074	-1+0,074	-1,5+0,074	-1+0,074
Тип питателя	Вибрац.	Вибрац.	Вибрац.	Лотковый
Заземлённый электрод:				
диаметр, мм	150	300	150	-
длина, мм	1000	1000	2000	2000
Частота вращения, мин ⁻¹	40-420	40-420	110-520	-
Диаметр отклоняющего электрода, мм	30	30	30	-
Расстояние между электродами, мм:				
сверху	-	-	-	0-200
снизу	-	-	-	-
Напряжение на электродах, кВ	40	40	50	40
Установочная мощность, кВт	4,2	4,2	16,5	0,5
Габаритные размеры, мм:				
длина	2750	2750	3620	2890
ширина	1692	2500	2700	2120
высота	3922	4790	3950	4610
Масса, т	4,9	8,9	18	5,4

При обогащении по электрической проводимости установлена возможность разделения следующих пар минералов (по А. И. Месеняшину): арсенопирит - полевой шпат; асбест – силикаты; барит – силикаты; вольфрамит – силикаты; графит – силикаты; железо – силикаты; золото – платиновые пески; известняк – силикаты; ильменит – апатит; ильменит – гранат; ильменит – турмалин; ильменит – циркон; каолин – примеси железа; касситерит – монацит; касситерит – циркон; касситерит – шеелит; кианит – рутил; колумбит – монацит; кобальт – серебро – силикаты; молибденит – биотит; молибденит – силикаты; монацит – пески; пирит – шеелит; пирохлор – апатит; пи-

рохлор – сфен; полевой шпат – слюда; рутил – монацит; рутил – циркон; сподумен – касситерит; стибнит – силикаты; флюорит – силикаты; хромит – гранат; хромит – ильменит.

При обогащении на трибоэлектростатических сепараторах хорошие показатели можно получить при разделении следующих пар минералов (по А. И. Месеняшину): апатит – кварц; асбест – серпентин; асбест – силикаты; барит – кварц; вермикулит – полевые шпаты; галит – сильвин; известняк – кварц; натриевый шпат – калиевый шпат; полевой шпат – кварц; фосфорит – кварц.

Обогащение (доводка) коллективных концентратов

Схемы обогащения коллективных гравитационных концентратов россыпных месторождений приведены на рис. 5.4. Схемы включают операции магнитного, электрического и гравитационного обогащения. Принципиально технологические схемы можно разделить на схемы с магнитной сепарацией в начале процесса (если в гравитационном концентрате много магнитных минералов) и схемы с электрической сепарацией в начале процесса (если в гравитационном концентрате много минералов-диэлектриков).

Основные минералы-проводники, входящие в состав гравитационных концентратов: магнетит, ильменит, рутил; минералы-непроводники – циркон, дистен, кварц, турмалин, монацит и ставролит. Назначением электрической сепарации в данных схемах является извлечение рутила с помощью коронно-электростатических сепараторов. На большинстве фабрик с помощью электрической сепарации получают рутиловый концентрат, содержащий не менее 97 % рутила при извлечении рутила в проводящую фракцию 93-95 % от операции доводки. Дистеновый концентрат можно получать с помощью трибоэлектростатической сепарации.

В схемах доводки коллективных гравитационных концентратов перед электрическим обогащением применяют операции сушки. Сушку осуществляют во вращающихся печах при температуре 80-120 °С. Иногда применяют очистку поверхности минералов от плёнок с помощью оттирки или растворения в кислотах. Электрическое обогащение осуществляют в несколько операций.

Электрическая сепарация также используется в схемах доводки черновых коллективных оловянных, вольфрамовых и танталонобиевых концентратов.

Обогащение слабомагнитных железных руд

Электрическая сепарация применяется при обогащении слабомагнитных железных руд (гематитовых, магнетито-гематитовых, мартитовых). Минералы этих руд (гематит, мартит, спекуллярит) имеют низкие магнитные свойства, но высокую электрическую проводимость. Схемы, как правило, включают операции гравитационного, магнитного и электрического обогащения и применяются на некоторых зарубежных фабриках.

Обогащение неметаллических полезных ископаемых

Электрическую сепарацию применяют при доводке *черновых алмазных концентратов* крупностью менее 4 мм. Материал перед обогащением обрабатывают реагентами, сушат, обеспыливают и классифицируют. Извлечение алмазов в концентрат составляет не менее 97 %.

В качестве примера электрического обогащения алмазов рассмотрим следующую схему. Исходный материал предварительно обесшламливают в разбавленной серной кислоте и высушивают. После первой операции электрической сепарации получается примерно 85 % проводящей (хвосты) и примерно 15 % непроводящей (концентрат) фракций. Концентрат растворяют в хромовой кислоте. Остаток обрабатывают соевым раствором, высушивают и сепарируют. После четырёх операций электрического разделения получают концентрат (непроводниковую фракцию) с массовой долей алмазов 24 % при выходе 0,16 % [9].

Электрическую сепарацию применяют в схемах обогащения *кварца, полевого шпата, вермикулита, фосфатных и калийных солей*. Как правило, в этих схемах используют трибоэлектростатическую сепарацию.

Обогащение вторичных металлов

Известны положительные результаты электросепарации дробленной *алюминиевой стружки* крупностью менее 3,0 мм на барабанных коронно-электростатических сепараторах. Отсевы стружки с содержанием алюминия от 20 до 60 % состоят из неэлектропровод-

ной части (кварцевый песок, глина, шлак, мелкая сильно окисленная стружка) и электропроводной части (в основном алюминиевая стружка и в меньшем количестве стружка бронзы, баббита, легированных сталей и др.). При промышленных испытаниях лучшие результаты получены по технологической схеме, согласно которой исходный материал подвергался вначале грохочению на два класса (+3 и -3 мм). Класс крупности -3+0 мм подвергался электросепарации на опытно-промышленном трехбарабанном сепараторе ИГДАН по схеме с пересортировкой промпродукта. Промпродукт первого приема обогащения дробился до -0,8 мм и направлялся на второй прием в тот же сепаратор с получением концентрата и хвостов. Класс +3 мм, концентраты первого и второго приема обогащения составляют суммарный концентрат с содержанием алюминия 82-90 % и извлечением 98 %. Режимы обоих приемов сепарации одинаковы: напряжение на электродах 45 кВ; температура поверхности осадительных электродов 180 °С (без нагрева разделения не происходит); скорость вращения барабанов 0,8 м/с; производительность 800 кг/ч [11].

Горнорудное бюро США разработало установку по отделению *алюминия* электростатическим способом от неметаллического материала (картон, дерево, камни, резина). Установка, работающая на опытном заводе, весьма эффективна, но чувствительна к влаге. Поэтому технология предусматривает сушку влажного материала в печи с последующей загрузкой в электростатический сепаратор. После первой операции сепарации из материала, содержащего 15 % металла, извлекается до 90 % алюминия. Отходы первой операции обогащения направляются на вторую стадию электростатической сепарации, где дополнительно извлекается продукт, содержащий 45-50 % металла [11].

В настоящее время в некоторых странах электростатические и коронно-электростатические сепараторы применяют в промышленности для извлечения цветных металлов из твердых бытовых отходов и для отделения бумаги от пластмассы. Цветные металлы имеют электропроводность на несколько порядков выше, чем прочие содержащиеся в отходах материалы, поэтому они хорошо выделяются в электрическом поле. Интересные результаты получены

при отделении бумаги от полимерной пленки из легкой фракции твердых бытовых отходов. Для этих целей используются коронные, электростатические и трибоэлектростатические сепараторы. Например, при сепарации полимерной пленки и бумаги крупностью менее 75 мм получен концентрат с содержанием пленки 98-100 % при извлечении 95-98 % [11].

Значительным источником сырья для вторичной цветной металлургии являются лом и отходы производства электронных ламп, ламп накаливания, промышленной и бытовой радиоэлектронной аппаратуры - радиоэлектронный лом. Радиоэлектронный лом содержит черные, цветные и благородные металлы. Для получения металлических концентратов необходимы операции уменьшения крупности радиодеталей и других элементов с целью вскрытия металлической части из неметаллической (пластмасса, керамика, гетинакс, текстолит и др.). Черный металл и связанные с ним другие металлы хорошо выделяются магнитной сепарацией, а цветные и благородные металлы выделяются в концентраты с помощью электрической сепарации. Наиболее сложной частью радиоэлектронного лома, с учетом переработки, являются платы печатного монтажа с навесными радиоэлементами. Однако если провести предварительное снятие элементов с плат и перерабатывать платы и различные группы навесных радиоэлементов по отдельным технологиям, то задача получения нескольких металлических концентратов становится технологически осуществимой [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены магнитные и электрические методы, являющиеся основными процессами обогащения полезных ископаемых и другого вида сырья.

Подробно описаны физические основы магнитных и электрических методов обогащения. Рассмотрены формулы основных сил и их составляющие, по которым осуществляется разделение частиц в магнитных и электрических полях. Приведены таблицы с магнитными и электрическими свойствами минералов, на основании которых можно сделать вывод о применении магнитного или электриче-

ского метода обогащения. Рассмотрены конструкции магнитных и электрических сепараторов и принцип разделения исходного материала в них. Описаны области применения рассматриваемых методов обогащения, и приведены технологические схемы.

Материал, изложенный в учебном пособии, поможет студенту получить глубокие знания процессов магнитного и электрического обогащения и решать в последующем как научные, так и производственные задачи по данной проблеме.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деркач В. Г. Специальные методы обогащения полезных ископаемых. М.: Недра, 1966. 338 с.
2. Деркач В. Г. Магнитное обогащение слабomagнитных руд. М.: Металлургиздат, 1954. 296 с.
3. Кармазин В. И., Кармазин В. В. Магнитные методы обогащения. М.: Недра, 1984. 416 с.
4. Кармазин В. В., Кармазин В. И. Магнитные и электрические методы обогащения: Учебник для вузов. М.: Недра, 1988. 304 с.
5. Кравец Б. Н. Специальные и комбинированные методы обогащения: Учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 304 с.
6. Ломовцев Л. А. Оборудование для магнитного обогащения слабomagнитных руд (Обзор. информ. Сер. обогащение руд, Вып. 2). М.: Черметинформация, 1985. 23 с.
7. Малый Б. Н., Ломовцев Л. А. Комплексное использование рудного сырья при применении сухой магнитной сепарации дроблённых магнетитовых руд (Обзор. информ. Сер. обогащение руд. Вып. 2). М.: Черметинформация, 1988. 25 с.
8. Ленуар М. Р., Гладков С. А. Новые направления в конструировании сухих магнитных сепараторов высокой напряжённости на постоянных магнитах // Обогащение руд. 1998. № 1. С. 35-37.
9. Олофинский Н. Ф. Электрические методы обогащения. М.: Недра, 1977. 519 с.

10. Азбель Ю. А. Оценка технологических возможностей нового поколения электромагнитных сухих валковых сепараторов высокой интенсивности // Обогащение руд. 1994. № 4. С. 19-21.

11. Пелевин А. Е. Разделение вторичных металлов в магнитных и электрических полях: Учеб. пос. Екатеринбург: Изд-во УГ-ГГА, 1996. 100 с.

12. Справочник по обогащению руд. Основные процессы. М.: Недра, 1982.

13. Справочник по обогащению руд. Обогащительные фабрики. М.: Недра, 1984. 358 с.

14. Справочник по обогащению руд чёрных металлов. М.: Недра, 1980. 527 с.

15. Сумцов В. П. Электромагнитные железоотделители. М.: Машиностроение, 1978. 174 с.

Учебное издание

Алексей Евгеньевич Пелевин

МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ

Учебное пособие

Третье издание, исправленное

Редактор Л. В. Устьянцева
Компьютерная вёрстка Пелевин А. Е.

Подписано в печать 2.02.2015. Бумага писчая. Формат 60х84 1/16.
Печать на ризографе. Печ.л. 10,0. Уч.-изд. л. 8,75. Тираж 100.
Заказ 10

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ.