

Министерство образования и науки РФ  
ФГБОУ ВО  
«Уральский государственный горный университет»



А. Е. Пелевин

# **МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ**

---

## **МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ**

Утверждено Редакционно-издательским советом  
Уральского государственного горного университета  
в качестве учебника

Екатеринбург, 2018

Рецензенты: Кафедра геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»  
(зав. кафедрой, доцент, канд. техн. наук И. А. Гришин,  
профессор, д-р техн. наук В. Б. Чижевский)

С. Ю. Макушев, главный обогатитель; В. Н. Бузмаков, главный инженер УКП, канд. геол.-минерал. наук (АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат»).

Печатается по решению Редакционно-издательского совета  
Уральского государственного горного университета

**Пелевин А. Е.**

П 24 Магнитные и электрические методы обогащения. Магнитные методы обогащения: учебник / Пелевин А. Е.; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. – 296 с.  
ISBN 978-5-8019-0435-1

В учебнике изложены физические основы магнитных методов обогащения. Приведены магнитные свойства минералов. Рассмотрены конструкции магнитных сепараторов и вспомогательного оборудования. Освещены вопросы практики магнитного обогащения и расчёта технологических схем. В учебнике приведены примеры задач с решениями, которые могут быть использованы для практических расчетов.

Материал учебника соответствует учебной программе дисциплины «Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых», соответствующей Федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования по направлению подготовки 21.05.04 «Горное дело» для специализации «Обогащение полезных ископаемых».

Книга может быть полезна инженерно-техническим и научным работникам, занимающимся вопросами магнитного и электрического обогащения и проектирования обогатительных фабрик.

УДК 622.777/778

ISBN 978-5-8019-0435-1

© Уральский государственный  
горный университет, 2018  
© Пелевин А. Е., 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                          | 6   |
| МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ .....                                                   | 10  |
| 1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ<br>МЕТОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ .....                             | 10  |
| 1.1. Терминология магнитных методов обогащения .....                                                    | 10  |
| 1.2. Область применения магнитных методов и их технологические задачи..                                 | 11  |
| 1.3. Классификация магнитных методов обогащения .....                                                   | 14  |
| 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТНОГО МЕТОДА ОБОГАЩЕНИЯ .....                                                 | 20  |
| 2.1. Основные характеристики электромагнитного поля.....                                                | 20  |
| 2.2. Силы, действующие на частицы при магнитной сепарации.....                                          | 26  |
| 2.3. Магнитная сила и её составляющие .....                                                             | 30  |
| 2.4. Магнитные поля сепараторов.....                                                                    | 33  |
| 2.4.1. Магнитное поле сепараторов для сильномагнитных руд с открытыми<br>многополюсными системами ..... | 34  |
| 2.4.2. Магнитная сила, действующая на частицу с заданным размером в<br>рабочей зоне сепаратора .....    | 39  |
| 2.4.3. Оптимизация шага полюсов открытой многополюсной системы .....                                    | 42  |
| 2.4.4. Магнитное поле валковых сепараторов с замкнутой системой для<br>слабомагнитных руд .....         | 47  |
| 2.4.5. Магнитное поле высокоградиентных сепараторов.....                                                | 54  |
| 2.4.6. Экспериментальное определение индукции (напряжённости)<br>магнитного поля сепаратора.....        | 58  |
| 2.4.7. Влияние крупности частиц на магнитную силу и на результаты<br>магнитной сепарации .....          | 61  |
| 2.5. Динамика движения частиц в магнитных сепараторах.....                                              | 70  |
| 2.5.1. Движение частиц руды в сухих сепараторах с верхней подачей .....                                 | 70  |
| 2.5.2. Движение частиц руды в сухих сепараторах с нижней подачей.....                                   | 76  |
| 2.5.3. Движение частиц руды в мокрых барабанных сепараторах с нижней<br>подачей.....                    | 80  |
| 2.6. Физические основы феррогидростатической сепарации .....                                            | 84  |
| 2.7. Физические основы электродинамической сепарации.....                                               | 101 |
| 3. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ .....                                                                   | 113 |
| 3.1. Магнитная восприимчивость и классификация минералов по магнитным<br>свойствам.....                 | 113 |

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2. Зависимость магнитной восприимчивости сильномагнитных минералов от формы частиц .....          | 116 |
| 3.3. Магнитный гистерезис.....                                                                      | 118 |
| 3.4. Определение магнитных свойств минералов .....                                                  | 121 |
| 3.5. Магнитные свойства сильномагнитных минералов .....                                             | 124 |
| 3.6. Магнитная флокуляция магнетита и коэрцитивная сила .....                                       | 132 |
| 3.7. Магнитная восприимчивость слабомагнитных минералов рудных и нерудных полезных ископаемых ..... | 136 |
| 3.8. Магнитная восприимчивость слабомагнитных породных минералов ....                               | 138 |
| 4. МАГНИТНЫЕ СЕПАРАТОРЫ .....                                                                       | 141 |
| 4.1. Классификация и обозначение магнитных сепараторов.....                                         | 141 |
| 4.2. Сепараторы со слабым магнитным полем для сухого обогащения сильномагнитных руд .....           | 146 |
| 4.3. Железоотделители .....                                                                         | 154 |
| 4.4. Сепараторы со слабым магнитным полем для мокрого обогащения сильномагнитных руд .....          | 159 |
| 4.5. Валковые сепараторы с сильным магнитным полем для обогащения слабомагнитных руд.....           | 168 |
| 4.6. Высокоградиентные сепараторы для обогащения слабомагнитных руд                                 | 175 |
| 4.7. Сепараторы со сверхпроводящими магнитными системами .....                                      | 188 |
| 4.8. Вспомогательное оборудование, применяемое при обогащении сильномагнитных руд .....             | 191 |
| 4.9. Феррогидростатические сепараторы.....                                                          | 197 |
| 4.10. Электродинамические сепараторы .....                                                          | 201 |
| 4.11. Лабораторные магнитные сепараторы .....                                                       | 204 |
| 4.12. Производительность магнитных сепараторов.....                                                 | 208 |
| 5. ПРАКТИКА МАГНИТНОГО ОБОГАЩЕНИЯ .....                                                             | 216 |
| 5.1. Подготовка руды перед магнитным обогащением .....                                              | 216 |
| 5.2. Обогащение магнетитовых и титаномагнетитовых руд.....                                          | 218 |
| 5.2.1. Классификация и характеристики железных руд .....                                            | 218 |
| 5.2.2. Требования к железным концентратам и железорудному сырью.....                                | 224 |
| 5.2.3. Схемы обогащения магнетитовых и титаномагнетитовых руд.....                                  | 228 |
| 5.2.4. Использование тонкого грохочения в схемах обогащения железных руд .....                      | 232 |
| 5.2.5. Повышение качества железных концентратов.....                                                | 237 |
| 5.2.6. Стадиальное выделение железного концентрата .....                                            | 244 |

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3. Обогащение слабомагнитных руд .....                               | 248 |
| 5.3.1. Обогащение гематитсодержащих руд .....                          | 249 |
| 5.3.2. Обжиг-магнитное обогащение .....                                | 255 |
| 5.3.3. Обогащение ильменитсодержащих руд и россыпей.....               | 257 |
| 5.3.4. Обогащение других руд и нерудного сырья .....                   | 262 |
| 5.4. Обогащение вторичного сырья .....                                 | 264 |
| 6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ СХЕМ ОБОГАЩЕНИЯ МАГНЕТИТОВЫХ<br>РУД .....    | 267 |
| 6.1. Расчёт технологического баланса переработки руды.....             | 267 |
| 6.2. Расчёт качественно-количественной схемы обогащения .....          | 269 |
| 6.2.1. Расчёт операции разделения в двухпродуктовом сепараторе .....   | 270 |
| 6.2.2. Расчёт операции разделения в трёхпродуктовом сепараторе.....    | 271 |
| 6.2.3. Расчёт замкнутых циклов измельчения .....                       | 273 |
| 6.2.4. Составление качественно-количественной схемы.....               | 278 |
| 6.3. Расчёт водно-шламовой схемы .....                                 | 280 |
| 6.4. Совмещённая качественно-количественная и водно-шламовая схема.... | 283 |
| КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....                                              | 287 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....                                 | 292 |

## ВВЕДЕНИЕ

*Магнитный метод обогащения* применяется в основном для получения железного концентрата, являющегося сырьём для производства чугуна и стали. Железо – самый используемый металл, что обусловлено его высоким содержанием в земной коре по сравнению с другими металлами (по разным оценкам 4,2-5 %, четвёртое место после O, Si и Al). Объёмы добычи и обогащения железных руд значительно превышают объёмы добычи других полезных ископаемых. Поэтому магнитный метод является не только основным методом, но и самым распространённым и применяемым методом обогащения.

Возрастающие потребности человечества в железе приводят к постоянному увеличению переработки железных руд. Россия занимает ведущее место в мире по добыче железных руд (5-е место) и по производству стали. По количеству железа в разведанных запасах железных руд Россия делит 1-2-е места с Бразилией. Производительность обогатительных фабрик железорудных ГОКов достигает 50 млн т/год и выше. Детально разведаны и подготовлены к освоению крупные железорудные месторождения Якутии и Дальнего Востока.

Кроме обогащения железных руд магнитный метод нашёл широкое применение при обогащении марганцевых руд, титансодержащих руд и россыпей и других полезных ископаемых. Магнитный метод нашёл широкое применение и в других отраслях промышленности – от переработки вторичного сырья до очистки пищевого сырья.

Магнитный метод обогащения постоянно развивается и совершенствуется – разрабатываются новые схемы, технологии, способы и аппараты.

Теория магнитных и электрических методов обогащения базируется на фундаментальных работах Гильберта, Фарадея, Максвелла, Лоренца, Ампера, Тесла и других учёных. Значительный вклад в развитие теории электромагнитного поля внесли российские и советские физики Якоби Б. С., Ленц Э. Х., Столетов А. Г., Аркадьев В. К., Капица П. Л., Акулов Н. С., Ландау Л. Д., Шур Я. Ш., Кондорский Е. И., Вонсовский С. В., Путилов Ю. Г. и другие учёные.

Железо и другие полезные ископаемые используются человеком с древних времён. Использование постоянных магнитов для оценки качества железных руд описано в XVI веке Георгием Агриколой в трактате «О горном деле и металлургии» [1].

Первым патентом считают английский патент от 1792 г., выданный Фуллеру, на сепарацию железной руды при помощи магнита [8]. Начало промыш-

ленного применения магнитного метода относится к концу XIX в., когда в США – Боллом и Нортоном и в Швеции – Венстремом и Таге Морзеллом были разработаны первые барабанные сепараторы с чередующейся полярностью для сухого обогащения магнетитовых руд. Аналогичный сепаратор, но с вращающимся магнитным полем создаётся в Италии (Пальмер, 1854 г.). 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 [10, 21]. В конце XIX в. для магнитного обогащения слабомагнитных руд Ветериллем (США) был разработан ленточный сепаратор с замкнутой электромагнитной системой и заостренными полюсами. Несколько позже Ульрих предложил конструкцию кольцевого сепаратора для сухого и мокрого обогащения мелких слабомагнитных руд [10, 21].

В 1916-1920 гг. разработаны конструкции сепараторов спирального типа (Дэвис), ленточного для мокрой сепарации частично окисленных магнетитовых руд (Роч) и индукционно-роликового для мелкозернистых слабомагнитных руд (Джонсон). В 1934 г. Крокет предложил ленточный сепаратор для обогащения тонкоизмельчённых сильномагнитных руд с нижней подачей исходного материала, который получил широкое распространение. Во второй половине XX века ленточные сепараторы были заменены на более надёжные и производительные барабанные сепараторы.

Промышленное применение магнитной сепарации слабомагнитных зернистых и кусковых руд было освоено в 40-х годах XX века на базе барабанно-ручейковых сепараторов фирмы «Крупп» (Германия). В дальнейшем для обогащения слабомагнитных мелкозернистых руд и шламов были разработаны высокоградиентные сепараторы (например, сепаратор Джонса ДР-317 (Германия) или сепаратор «Sala-Carousels» (Швеция)) [21, 25].

В России первый барабанный магнитный сепаратор был разработан в 1911 г. инженером В. А. Петровым на Урале и применен для сухой сепарации магнетитовой руды. Первые промышленные сепараторы были разработаны в институте «Механобр» в 20-х годах XX века. Серийное изготовление отечественных магнитных сепараторов было начато в 30-х годах XX века. Изготавливали их на заводах им. Котлякова в Ленинграде и им. Пархоменко в Ворошиловграде. В настоящее время самым крупным предприятием по производству

магнитных сепараторов является Воронежский завод горно-обоганительного оборудования. Промышленные магнитные сепараторы выпускают и другие предприятия.

Первые промышленные магнитные сепараторы работали на обогачительных фабриках Урала (горы Благодать и Высокая) и Алтая (Темир-Тау и Мундыбаш). До 1941 г. промышленностью был освоен выпуск сепараторов только для обогащения железных сильномагнитных руд. После 1945 г. были разработаны конструкции сепараторов с сильным магнитным полем для обогащения слабомагнитных руд, например ручейково-роликовый сепаратор (В. Г. Деркач, В. И. Кармазин) и валковый сепаратор (В. И. Кармазин, В. В. Крутий) [21]. В XXI веке В. В. Кармазиным разработаны конструкции высокоселективных сепараторов для обогащения тонкоизмельчённых магнетитовых руд.

Россия занимает ведущее место в мире по разработке новых конструкций сепараторов и технологий магнитного обогащения [19, 21, 23]. Отечественные сепараторы по производительности и эффективности разделения не уступают лучшим зарубежным аналогам. Разработаны конструкции сепараторов с использованием редкоземельных постоянных магнитов. В настоящее время в России выпускаются все типы магнитных сепараторов (для сухого и мокрого обогащения, с сильным и слабым полем), железоотделителей и другого специального оборудования, применяемого при магнитном обогащении.

**Электрический метод обогащения** применяется не так широко, как магнитный. Его применяют, если другие методы обогащения менее эффективны или необходима сухая технология.

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. Блек и Моршер изобрели электростатический сепаратор для разделения проводниковых и непроводниковых частиц. Этот сепаратор в 1905 г. был усовершенствован Гуффом и в начале XX века нашёл промышленное применение на ряде фабрик цветной металлургии для доводки гравитационных концентратов и промпродуктов. Джонсон в 30-е годы XX века усовершенствовал электрическую часть сепаратора Гуффа. Тогда же он установил явление обратимости минералов.

Советские и российские учёные внесли значительный вклад в развитие теории и практики электрических методов обогащения. В 1936 году Н. Ф. Оло-

финский, М. В. Бачковский и П. М. Рывкин изобрели новый метод электрического обогащения – сепарацию в поле коронного разряда. В 50-60-х годах XX века И. Н. Плаксиным и Н. Ф. Олофинским разработан трибоадгезионный метод электрического обогащения, А. И. Ангеловым, В. И. Ревнивцевым и Ю. Н. Набиулиным усовершенствован трибоэлектростатический метод.

В настоящее время в России разработаны и выпускаются различные конструкции электрических сепараторов, реализующие все методы электрического обогащения [21, 29, 30, 36, 39, 71, 72].

Значительный вклад в развитие магнитных и электрических методов обогащения внесли советские и российские учёные Деркач В. Г., Дацюк И. С., Кармазин В. И., Сочнев А. Я., Кармазин В. В., Копычев П. А., Евсиович С. Г., Журавлёв И. С., Егоров В. Л., Ломовцев Л. А., Младецкий И. К., Марюта А. Н., Остапенко П. Е., Пирогов Б. М., Чантурия В. А., Плаксин И. Н., Олофинский Н. Ф., Ревнивец В. И., Месеняшин А. И., Бачковский В. М., Ангелов А. И., Урванцев А. И., Кравец Б. Н., чьи труды использованы при написании настоящего учебника.

# МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

## 1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ

### 1.1. Терминология магнитных методов обогащения

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

*Магнитное поле* – поле, действующее на движущиеся электрические заряды, а также на тела, обладающие магнитным моментом, независимо от состояния их движения. При разделении минералов магнитное поле действует на частицы, обладающие магнитным моментом (кроме феррогидростатической и электродинамической сепарации). Величину силового поля характеризует магнитная сила.

*Магнитная сила* – сила, обусловленная взаимодействием магнитного поля и магнитным моментом частицы. Иногда магнитную силу называют пондеромоторной магнитной силой. Раньше пондеромоторными силами называли невидимые силы, способные перемещать «весомые» тела.

*Магнитный момент* – величина, характеризующая магнитные свойства частицы, находящейся в магнитном поле. Магнитный момент прямо пропорционален магнитным свойствам частицы, её объёму и напряженности внешнего магнитного поля.

*Магнитная восприимчивость* (объёмная и удельная) – величина, характеризующая магнитные свойства минералов и частиц и являющаяся основным признаком разделения при магнитной сепарации.

*Магнитная сепарация* – процесс разделения смеси частиц с разными магнитными свойствами в магнитном сепараторе.

*Магнитный сепаратор* – аппарат, в котором частицы с повышенными магнитными свойствами попадают в один приёмник, а частицы с пониженными магнитными свойствами – в другой приёмник. Количество продуктов разделения в одном сепараторе может быть больше двух.

Продукты разделения смеси частиц при магнитной сепарации называют:

- *магнитный* – продукт с повышенными магнитными свойствами;
- *промпродукт* – продукт с промежуточными магнитными свойствами;

- *немагнитный* – продукт с пониженными магнитными свойствами.

Продукты разделения при магнитной сепарации обозначаются буквами: «м» – магнитный; «пп» – промпродукт; «н» – немагнитный.

*Магнитная система сепаратора* – источник магнитного поля в зоне разделения сепаратора.

## **1.2. Область применения магнитных методов и их технологические задачи**

Магнитные методы обогащения применяют при переработке различных металлических и неметаллических полезных ископаемых и других видов сырья. При этом если в руде содержатся минералы, имеющие магнитные свойства, то на стадии разработки схемы обогащения обязательно рассматривают возможность применения магнитного метода. Рассмотрим *основные области применения магнитных методов*.

1. Обогащение руд черных и других металлов с выделением в концентрат магнитных рудных минералов (железные, марганцевые и хромитовые руды, ильменитсодержащие и вольфрамсодержащие руды и россыпи). Основной областью применения является обогащение железных руд.

2. Обогащение неметаллических и металлических полезных ископаемых с удалением в хвосты рудных и породных минералов, обладающих магнитными свойствами. Магнитная сепарация применяется, например, при обогащении угля (обессеривание), талька, кварца, алмазов, благородных и редких (тантал, ниобий) металлов.

3. Обезжелезивание концентратов неметаллических полезных ископаемых и другого сырья (удаление железистых примесей из стекольного, керамического, каолинового, формовочного, абразивного, пищевого и другого сырья). В хвосты удаляется железо в основном в виде окислов. В качестве примера можно привести обезжелезивание конечных концентратов кварца и полевого шпата, формовочных песков.

4. Удаление случайных железных предметов из различных продуктов обогатительных фабрик. Для этой цели применяют магнитные аппараты, называемые железоотделителями. Случайные железные предметы способны повредить оборудование (например, дробилки) или снизить качество готовых концентратов (например, тальк, асбест).

Обезжелезивание и удаление случайных железных предметов из сырья и готовой продукции применяется не только в горно-металлургической промышленности, но и в других отраслях, например в пищевой промышленности.

5. Регенерация суспензий. Магнитная сепарация широко применяется на гравитационных фабриках с тяжелосредной сепарацией для извлечения магнетита и ферросилиция из отработанной суспензии с целью её восстановления. В магнитный продукт выделяют утяжелитель (сильномагнитные магнетит и ферросилиций), а в немагнитный продукт – шламистые частицы.

6. Переработка техногенного сырья (шламы и хвосты обогатительных фабрик; шлаки металлургического производства; кабельный, радиоэлектронный и другой лом цветных и черных металлов; твердые бытовые отходы). В линиях по переработке техногенного сырья магнитные методы нашли широкое применение.

#### *Технологические задачи магнитных методов обогащения*

Технологические задачи магнитных методов обогащения в основном обусловлены областью их применения.

На стадии дробления сильномагнитных железных руд магнитный метод относится к методам предварительного обогащения. При этом решаются следующие технологические задачи.

1. Вывод из процесса максимального количества дроблёной немагнитной (породной) части руды. При этом немагнитный продукт в большинстве случаев не является отвальным – он используется для производства строительных материалов.

Использование сухой магнитной сепарации для предварительного обогащения железной руды с получением промпродукта и хвостов повышает технико-экономические показатели работы предприятия: снижаются затраты на измельчение и на мокрое обогащение; увеличивается массовая доля железа в руде (в промпродукте), что снижает количество мокрых хвостов, перекачиваемых в хвостохранилище; улучшается однородность (измельчаемость, вещественный состав) поступающей на измельчение и обогащение руды благодаря уменьшению диапазона колебаний измельчаемости и вещественного состава минеральных разновидностей руды.

2. Вовлечение в переработку бедных и забалансовых руд и руд с повышенным содержанием разубоживающих пород. Для решения этой технологической задачи целесообразно применять сухую магнитную сепарацию непосредственно в карьере (на борту карьера) или в шахте. Используются стационарные

или полумобильные комплексы, включающие как дробильное, так и обогащенное оборудование. При сухой магнитной сепарации получают кондиционную руду и отвальные хвосты. Экономическая эффективность в этом случае заключается в повышении полноты использования недр и вовлечении в переработку руд со сложными горно-технологическими условиями добычи (повышенное содержание в руде разубоживающих пород).

3. Получение концентрата из крупнокусковой руды. В ряде случаев с помощью сухой магнитной сепарации получают готовые крупнокусковые железные концентраты – агломерационную руду (аглоруду, 0-10 мм) и доменную руду (0-100 мм).

Аглоруда после додрабливания добавляется в шихту для производства агломерата (массовая доля в шихте около 10 %). Добавление аглоруды в агломерационную шихту повышает технико-экономические показатели процесса агломерации железных концентратов. Поэтому аглоруда является востребованным продуктом.

Доменная руда без окускования направляется в домну для производства чугуна. В настоящее время доменную руду практически не получают в связи со снижением массовой доли железа в добываемых рудах.

4. Разделение руды на природные (технологические) типы. На стадии рудоподготовки гематит-магнетитовых и ильменит-титаномagnetитовых руд с помощью сухой магнитной сепарации возможно разделение добытой руды на два технологических типа, обогащаемых в дальнейшем по разным схемам. Например, при обогащении гематит-магнетитовых кварцитов возможно получение магнетитового и гематитового типов руды, а при обогащении ильменит-титаномagnetитовых руд возможно получение титаномagnetитового и ильменитового типов руды.

На стадии глубокого обогащения руд магнитный метод относится к основным методам обогащения. При этом решаются следующие технологические задачи.

1. Получение конечных концентратов. В этом случае с помощью магнитного обогащения получают готовый концентрат и отвальные хвосты. Технология магнитного обогащения должна обеспечить требуемое качество концентрата при максимальном извлечении полезного компонента в концентрат.

2. Получение черновых концентратов. При обогащении ряда руд, например гематитовых и ильменитовых, с помощью магнитной сепарации получают

черновые концентраты, которые затем дообогащают другими методами. С помощью магнитного обогащения выводят в хвосты часть породных минералов.

3. Обогащение коллективного концентрата с получением моноконцентрата. При обогащении титан-циркониевых россыпей из коллективного гравитационного концентрата с помощью магнитной сепарации получают ильменитовый концентрат и немагнитный продукт, содержащий другие полезные минералы.

4. Доводка концентратов, полученных другими методами обогащения. В этом случае с помощью магнитного обогащения из концентрата удаляются вредные примеси, что позволяет повысить качество концентрата. Магнитная доводка конечного концентрата применяется, например, при обогащении кварца и полевого шпата для удаления слабомагнитных примесей.

### **1.3. Классификация магнитных методов обогащения**

Магнитные методы обогащения используются при осуществлении трёх технологических процессов – подготовительных, основных и вспомогательных.

*К подготовительным процессам* можно отнести:

- удаление случайных железных предметов перед операциями дробления;
- удаление металлического скрапа (обломки шаров) из слива мельниц;
- магнетизирующий обжиг слабомагнитных железных руд перед обогащением;
- размагничивание, намагничивание и селективную магнитную флокуляцию сильномагнитных продуктов.

*К вспомогательным процессам* можно отнести:

- магнитное обесшламливание магнетитсодержащих пульп;
- магнитное сгущение магнетитовых концентратов;
- магнитную очистку воды.

*К основным процессам* относится магнитная сепарация руд и других продуктов.

*Способы магнитной сепарации* можно разделить на две группы.

#### **1. Прямая магнитная сепарация.**

При прямой сепарации осуществляется разделение компонентов по магнитным свойствам в магнитном поле. Магнитное обогащение осуществляется в магнитных сепараторах, 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. Прямая сепарация получила наибольшее распространение и используется при обогащении сильномагнитных и слабомагнитных руд.

## *2. Непрямая сепарация.*

При непрямой сепарации разделение частиц осуществляется в магнитном поле, но не по магнитным свойствам. При магнитногидростатической (феррогидростатической) и магнитогидродинамической сепарации разделение осуществляется по плотности, при электродинамической сепарации разделение осуществляется по электрической проводимости и плотности.

Кроме этого, известны способы разделения с использованием комбинированных методов, например в магнитно-гравитационных сепараторах [50, 70], в гравитационно-магнитных аппаратах (шлюзы, столы, концентраторы и др.) [42, 60, 64], в коронно-магнитном сепараторе [29, 30] и др.

Среди многообразия процессов магнитной сепарации можно выделить шесть основных способов магнитного разделения. 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). Валковые сепараторы применяются реже (для обогащения слабомагнитных руд).

Способ осуществляется следующим образом (рис. 1.1, 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. Способ реализуется в сепараторах (барабанных, валковых, роликовых и др.) с нижней (реже боковой) подачей исходного материала. Наибольшее распространение получила мокрая магнитная сепара-

ция измельченных сильномагнитных железных руд (барабанные сепараторы). Валковые сепараторы применяются реже для обогащения слабомагнитных руд.

Способ осуществляется следующим образом (рис. 1.1, 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). Способ реализуется в высокоградиентных (полиградиентных) сепараторах. Наибольшее распространение получила мокрая высокоградиентная магнитная сепарация тонкоизмельченных слабомагнитных материалов.

Способ осуществляется следующим образом (рис. 1.1, 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 шарикам, а остальные частицы (немагнитные) удаляются потоком воды. После удаления немагнитных частиц рабочая матрица сепаратора выводится из зоны действия внешнего магнитного поля и осуществляется удаление слабомагнитных частиц потоком воды.

4. Магнитометрическая сортировка зернистых материалов. 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. 1.1, г). 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.

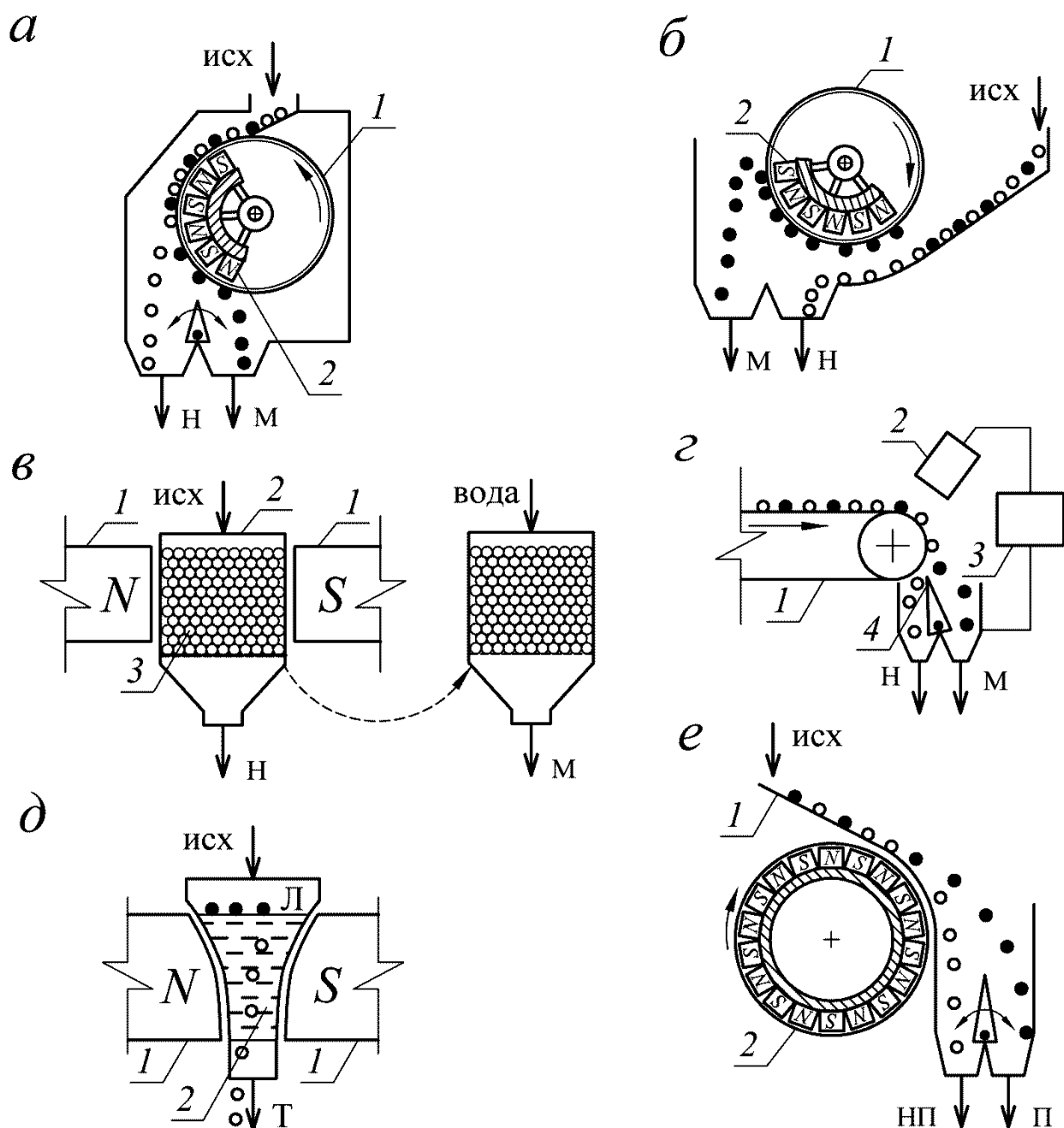


Рис. 1.1. Способы магнитного обогащения:

*а* – 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* – магнетогидростатическая 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

5. Магнитогидростатическая сепарация. Способ реализуется в феррогидростатических сепараторах для разделения немагнитных минералов и металлов. Магнитогидростатическую сепарацию (МГС) часто называют феррогидростатической (ФГС) или магнитожидкостной (МЖ) сепарацией.

Признаком разделения при магнитогидростатическом обогащении, как и при тяжелосредном обогащении, является плотность. Особенностью магнитогидростатического разделения является то, что требуемая эффективная плотность ферромагнитной жидкости (до  $20000 \text{ кг/м}^3$ ) 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. МГД-сепараторы в настоящее время не получили промышленного применения.

Магнитогидростатический метод осуществляется следующим образом (рис. 1.1, д). Частицы разделяемого продукта подаются в рабочую кювету 2 сепаратора, заполненную ферромагнитной жидкостью (ФМЖ) и находящуюся между полюсами магнитной системы 1. Обычно физическая плотностьготавливаемых ФМЖ не превышает  $1300 \text{ кг/м}^3$ . Под действием магнитного поля плотность ФМЖ «возрастает» до  $12000 \text{ кг/м}^3$  и более. Кажущуюся плотность ФМЖ в магнитном поле называют эффективной плотностью. Частицы разделяемого материала, имеющие плотность выше эффективной плотности магнитной жидкости, опускаются на дно ванны сепаратора, а частицы, имеющие более низкую плотность, остаются на поверхности жидкости.

6. Электродинамическая сепарация. 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 электродвижущей силы, индуцируемой переменным 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 электромагнитных систем, питаемых переменным током;

2 – при движении частиц относительно магнитной системы из постоянных магнитов с чередующейся полярностью полюсов;

3 – при вращении магнитной системы из постоянных магнитов с чередующейся полярностью полюсов.

Электродинамический метод осуществляется следующим образом (рис. 1.1, 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.

Кроме рассмотренных шести основных способов магнитного разделения существуют и другие способы, либо малораспространённые либо имеющие особенности разделения и перемещения частиц (например, магнитная сепарация в переменном магнитном поле).

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТНОГО МЕТОДА ОБОГАЩЕНИЯ

### 2.1. Основные характеристики электромагнитного поля

*Электромагнитное поле* – фундаментальное физическое поле, взаимодействующее с электрически заряженными телами, а также с телами, имеющими собственные электрические и магнитные моменты. Электромагнитное поле представляет собой совокупность электрического и магнитного полей, которые могут, при определённых условиях, порождать друг друга. Электромагнитное поле (и его изменение со временем) описывается в электродинамике посредством системы уравнений Максвелла. Электромагнитное поле характеризуется напряженностями и индукциями электрического и магнитного поля.

*Магнитное поле* – силовое поле, действующее на движущиеся электрические заряды, а также на тела, обладающие магнитным моментом, независимо от состояния их движения. Магнитное поле создаётся током заряженных частиц и (или) магнитными моментами электронов в атомах (и магнитными моментами других частиц, что проявляется в меньшей степени). Кроме этого, оно возникает в результате изменения во времени электрического поля.

*Электрическое поле* – одна из форм электромагнитного поля, существующее вокруг тел или частиц, обладающих электрическим зарядом, а также возникающее при изменении магнитного поля. Электрическое поле невидимо и выявляется по силовому воздействию на заряженные тела.

*Электромагнитная индукция* – явление возникновения электрического тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, проходящего через него. Электромагнитная индукция была открыта Майклом Фарадеем в 1831 году. Возникающий ток называется *индукционным током*.

Основные величины электромагнитного поля (магнитного и электрического полей), их единицы измерения и основные уравнения, используемые в теории и практике магнитного и электрического обогащения, приведены в табл. 2.1.

*Индукция магнитного поля ( $B$ )* – векторная величина, являющаяся силовой характеристикой магнитного поля (его действия на заряженные частицы или на тела, обладающие магнитным моментом).

Индукция магнитного поля обозначается буквой  $B$  и измеряется в системах СИ и СГСМ, соответственно в теслах (Тл) и в гауссах (Гс).

Таблица 2.1

Основные величины электромагнитного поля, единицы их измерения и основные уравнения, используемые в теории и практике магнитного и электрического обогащения

| Величина                                                              | Обозначение        | Основные уравнения в системах |                              | Единица измерения                                                  |                                                                    | Соотношения между единицами СИ и СГСМ                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                       |                    | СИ                            | СГСМ                         | СИ                                                                 | СГСМ                                                               |                                                                                                                    |
| Напряжённость магнитного поля                                         | $H$                | $H=B/\mu_0-J$                 | $H=B-4\pi J$                 | ампер на метр, А/м                                                 | эрстед, Э                                                          | $1 \text{ А/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Э} \approx 1/80 \text{ Э}$                                              |
| Индукция магнитного поля                                              | $B$                | $B=\mu\mu_0 H$                | $B=\mu H$                    | тесла, Тл                                                          | гаусс, Гс                                                          | $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб/м}^2$ ; $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$                                               |
| Связь между $B$ и $H$ в вакууме ( $\mu=1$ )                           | —                  | $B=\mu_0 H$                   | $B=H$                        | —                                                                  | —                                                                  | —                                                                                                                  |
| Абсолютная магнитная проницаемость                                    | $\mu_{\text{абс}}$ | $\mu_{\text{абс}}=B/H$        | $\mu_{\text{абс}}=B/H$       | генри на метр, Гн/м                                                | Безразмерная                                                       | $\mu_{\text{абс}}[\text{СИ}] = \mu \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$<br>$\mu_{\text{абс}}[\text{СГСМ}] = \mu$ |
| Магнитная проницаемость (относительная)                               | $\mu$              | $\mu=1+\chi$                  | $\mu=1+4\pi \cdot \chi$      | Безразмерная                                                       | Безразмерная                                                       | —                                                                                                                  |
| Магнитная проницаемость вакуума (абсолютная) или магнитная постоянная | $\mu_0$            | $\mu_0=\mu_{\text{абс}}/\mu$  | $\mu_0=\mu_{\text{абс}}/\mu$ | генри на метр, Гн/м                                                | Безразмерная                                                       | $\mu_0[\text{СИ}] = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ ; $\mu_0[\text{СГСМ}] = 1$                                    |
| Намагниченность                                                       | $J$                | $J = M/V$                     | $J = M/V$                    | ампер на метр, А/м                                                 | эрстед, Э                                                          | $1 \text{ А/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Э} \sim 1/80 \text{ Э}$                                                 |
| Связь между $J$ и $H$                                                 | —                  | $J = \chi \cdot H$            | $J = \chi \cdot H$           | —                                                                  | —                                                                  | —                                                                                                                  |
| Объёмная магнитная восприимчивость вещества                           | $\chi$             | $\chi = J / H$                | $\chi = J / H$               | Безразмерная                                                       | Безразмерная                                                       | —                                                                                                                  |
| Магнитный момент                                                      | $M$                | $M=iS=JV= \chi HV$            | —                            | ампер квадратный метр, А·м <sup>2</sup> или джоуль на тесла, Дж/Тл | эрстед кубический метр, Э·см <sup>3</sup> или эрг на гаусс, эрг/Гс | $1 \text{ А} \cdot \text{м}^2 = 10^3 \text{ Э} \cdot \text{см}^3$<br>$1 \text{ Дж/Тл} = 10^3 \text{ эрг/Гс}$       |

Окончание таблицы 2.1

| Величина                                                         | Обозначение      | Основные уравнения в системах                                            |                                 | Единица измерения           |                                        | Соотношения между единицами СИ и СГСМ                                                         |
|------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                  |                  | СИ                                                                       | СГСМ                            | СИ                          | СГСМ                                   |                                                                                               |
| Удельная магнитная восприимчивость вещества                      | $\chi$           | $\chi = \alpha / \rho$                                                   | $\chi = \alpha / \rho$          | м <sup>3</sup> /кг          | см <sup>3</sup> /г                     | 1 м <sup>3</sup> /кг = 10 <sup>3</sup> см <sup>3</sup> /г                                     |
| Магнитная проводимость и индуктивность                           | $\Lambda$<br>$L$ | $\Lambda = \mu \mu_0 S / \Delta$<br>$L = \Phi / i$                       | –                               | генри, Гн                   | СГСМ <sub>Λ</sub><br>СГСМ <sub>L</sub> | 1 Гн = 10 <sup>9</sup> СГСМ                                                                   |
| Энергетическое произведение                                      | $BH$             | –                                                                        | –                               | тесла ампер на метр, Тл·А/м | гаусс эрстед, Гс·Э                     | 1 Тл·А/м = 40π Гс·Э = 125 Гс·Э<br>1 Гс·Э = 1/(40π) Тл·А/м = 8·10 <sup>-3</sup> Тл·А/м         |
| Магнитный поток                                                  | $\Phi$           | $\Phi = \int B dS$                                                       | –                               | вебер, Вб                   | максвелл, Мкс                          | 1 Мкс = 10 <sup>-8</sup> Вб                                                                   |
| Электрический заряд                                              | $q$              | $q = i \cdot t$                                                          | –                               | кулон, Кл                   | СГСЭ <sub>q</sub>                      | 1 Кл = 3·10 <sup>9</sup> СГСЭ <sub>q</sub>                                                    |
| Напряжённость электрического поля                                | $E$              | $E = F / q$                                                              | –                               | вольт на метр, В/м          | СГСЭ <sub>E</sub>                      | 1 В/м = 1/3·10 <sup>4</sup> СГСЭ <sub>E</sub>                                                 |
| Электрическое смещение (электрическая индукция)                  | $D$              | $D = \epsilon_0 E + P$<br>$D = \epsilon_{абс} E = \epsilon_0 \epsilon E$ |                                 |                             |                                        |                                                                                               |
| Электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума) | $\epsilon_0$     | $\epsilon_0$                                                             | 1                               | фарада на метр, Ф/м         | СГСЭ <sub>ε₀</sub>                     | $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м<br>1 Ф/м = 1/8,85·10 <sup>-12</sup> СГСЭ <sub>ε₀</sub> |
| Разность потенциалов, напряжение, ЭДС                            | $U$              | $U = A / q$                                                              | –                               | вольт, В                    | СГСЭ <sub>U</sub>                      | 1 В = 1/3000 СГСЭ <sub>U</sub>                                                                |
| Электрическая ёмкость                                            | $C$              | $C = \epsilon_{абс} S / d$                                               | $C = \epsilon_{абс} S / 4\pi d$ | фарада, Ф                   | сантиметр, см                          | 1 Ф = 9·10 <sup>11</sup> см                                                                   |
| Сила тока                                                        | $i$              | $i = U / R$                                                              | –                               | ампер, А                    | СГСЭ <sub>i</sub>                      | 1 А = 3·10 <sup>9</sup> СГСЭ <sub>i</sub>                                                     |
| Электрическое сопротивление                                      | $R$              | $R = U / i$                                                              | –                               | ом, Ом                      | СГСЭ <sub>R</sub>                      | 1 Ом = 1/(9·10 <sup>11</sup> ) СГСЭ <sub>R</sub>                                              |
| Электрическая проводимость                                       | $G$              | $G = 1 / R$                                                              | –                               | сименс, См                  | СГСЭ <sub>G</sub>                      | 1 См = 1/(1,11·10 <sup>-12</sup> ) СГСЭ <sub>G</sub>                                          |

*Напряжённость магнитного поля ( $H$ )* – дополнительная векторная величина, являющаяся количественной характеристикой магнитного поля. Напряжённость магнитного поля не зависит от магнитных свойств среды. Поэтому в вакууме и в других средах, не обладающих магнитными свойствами, величина напряжённости прямо пропорциональна величине индукции магнитного поля. В вакууме и в других немагнитных средах как напряжённость, так и индукцию магнитного поля можно использовать в качестве силовой количественной характеристики магнитного поля.

Напряжённость магнитного поля обозначается буквой  $H$  и измеряется в системах СИ и СГСМ, соответственно в А/м и в эрстедах (Э).

*Магнитная проницаемость вакуума (абсолютная) или магнитная постоянная ( $\mu_0$ )* в системе СИ равна  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м, в системе СГСМ равна единице. Эту величину следует рассматривать как постоянный коэффициент (константу) системы СИ для перехода от единиц измерения напряженности магнитного поля к единицам измерения индукции магнитного поля в вакууме. В системе СГСМ размерности  $H$  и  $B$  совпадают, а различные их названия (эрстед и гаусс) введены для разграничения магнитного поля в вакууме и в среде.

*Абсолютная магнитная проницаемость среды ( $\mu_{абс}$ )* – величина, характеризующая усиление или ослабление магнитного поля в среде по сравнению с вакуумом. Так как индукция магнитного поля количественно характеризует магнитное поле в любой среде, а напряжённость магнитного поля количественно характеризует поле в вакууме:

$$\mu_{абс} = B/H \quad (2.1)$$

$$\text{или } \mu_{абс} = \mu \mu_0. \quad (2.2)$$

Согласно равенству (2.2) в системе СИ абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_{абс} = \mu \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м, а в системе СГСМ – равна  $\mu$ .

*Магнитная проницаемость (проницаемость среды) или относительная магнитная проницаемость ( $\mu$ )* – величина, оценивающая, во сколько раз абсолютная магнитная проницаемость среды больше абсолютной магнитной проницаемости вакуума. Согласно равенству (2.2):

$$\mu = \mu_{абс} / \mu_0. \quad (2.3)$$

Магнитная проницаемость является безразмерной относительной величиной. При расчётах чаще пользуются  $\mu$  и  $\mu_0$ , а не  $\mu_{абс}$ . Поэтому величину  $\mu$  назы-

вают *магнитной проницаемостью* среды или вещества (слово «относительная» опускают), а величину  $\mu_0$  чаще называют *магнитной постоянной*.

Согласно определению, магнитная проницаемость (относительная) вакуума равна единице. Тогда абсолютная магнитная проницаемость вакуума равна магнитной постоянной ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м).

Магнитную проницаемость можно рассчитать по другой формуле:

$$\mu = 1 + \alpha, \quad (2.4)$$

где  $\alpha$  – магнитная восприимчивость (объёмная), доли ед.

Согласно формуле (2.4), магнитная восприимчивость (объёмная) среды или вещества показывает, на какую величину изменяется магнитная проницаемость этой среды или вещества, по сравнению с вакуумом.

Магнитное обогащение полезных ископаемых осуществляется в основном в воздушной и водной среде. Поэтому представляют интерес магнитные характеристики этих сред:

- объёмные магнитные восприимчивости воздуха и воды равны  $0,37 \cdot 10^{-6}$  и  $-9 \cdot 10^{-6}$  соответственно;

- магнитные проницаемости воздуха и воды равны 1,00000037 и 0,999991 соответственно.

Учитывая низкие значения магнитных свойств воздуха и воды, эти среды можно отнести к немагнитным средам и принять, что их магнитные свойства равны магнитным свойствам вакуума. Тогда абсолютная магнитная проницаемость воздуха и воды равна  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м, магнитная проницаемость воздуха и воды равна единице, а объёмная магнитная восприимчивость воздуха и воды равна нулю.

### ***Связь между индукцией и напряжённостью магнитного поля***

Индукция магнитного поля связана с напряжённостью магнитного поля соотношением (согласно формулам (2.1) и (2.2))

$$B = \mu \mu_0 H, \quad (2.5)$$

где  $B$  и  $H$  – индукция и напряжённость магнитного поля, Тл и А/м соответственно;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды (относительная);  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума или магнитная постоянная, Гн/м.

В воздухе и в воде (принимая  $\mu = 1$ ) индукция и напряжённость магнитного поля будут связаны соотношением

$$B = \mu_0 H. \quad (2.6)$$

Величина  $\mu_0$  является константой и служит для перехода от единиц измерения напряженности магнитного поля к единицам измерения индукции магнитного поля в вакууме, в воздухе, в воде и в других средах с  $\mu \sim 1$ .

Индукция или (и) напряжённость магнитного являются паспортной характеристикой магнитных сепараторов, с помощью которой можно оценить силу магнитного поля и применимость сепаратора для обогащения руды (разделения минералов) с конкретными магнитными свойствами.

Если разделение осуществляется в немагнитной среде (воздух, вода), что характерно для сепараторов, в которых осуществляются способы магнитного обогащения *a* и *б* (см. рис. 1.1), то в качестве силовой характеристики магнитного поля можно использовать как индукцию, так и напряжённость. Эти величины будут иметь одинаковый физический смысл, и связь между их единицами измерения будет прямо пропорциональна. Для барабанных магнитных сепараторов можно использовать как индукцию, так и напряжённость магнитного поля в зоне разделения сепаратора (в Тл или в кА/м). На промышленных предприятиях иногда используют единицы СГСМ – эрстеды или гауссы (редко). Для перехода от значений напряжённости к индукции и наоборот следует пользоваться формулой (2.6).

Соотношение между единицами напряжённости магнитного поля в системах СИ и СГСМ следующее:  $1 \text{ А/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Э} \approx (1/80) \text{ Э}$ . Соотношение между единицами индукции магнитного поля в системах СИ и СГСМ следующее:  $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$

В табл. 2.2 приведены примеры значений напряжённости и индукции, характеризующих одинаковые магнитные поля в системах СИ и СГСМ в немагнитной среде (в воздухе и в воде).

Таблица 2.2

Значения напряжённости и индукции, характеризующие одинаковые магнитные поля (в воздухе и в воде)

| Напряжённость магнитного поля |          | Индукция магнитного поля |        |
|-------------------------------|----------|--------------------------|--------|
| СГСМ, Э                       | СИ, кА/м | СГСМ, Гс                 | СИ, Тл |
| 800                           | 64       | 800                      | 0,08   |
| 1200                          | 96       | 1200                     | 0,12   |
| 1600                          | 128      | 1600                     | 0,16   |
| 3000                          | 240      | 3000                     | 0,3    |
| 5000                          | 400      | 5000                     | 0,5    |
| 10000                         | 800      | 10000                    | 1,0    |
| 15000                         | 1200     | 15000                    | 1,5    |
| 20000                         | 1600     | 20000                    | 2,0    |

Если зона разделения сепаратора заполнена ферромагнитной средой, что характерно для высокоградиентных и феррогидростатических сепараторов, в которых осуществляются способы магнитного обогащения  $\epsilon$  и  $\delta$  (см. рис. 1.1), то в качестве силовой характеристики магнитного поля следует использовать индукцию магнитного поля.

### **Пример**

В паспорте барабанного сепаратора, в котором осуществляется разделение в воздушной среде, приведена максимальная индукция магнитного поля на поверхности барабана, равная 0,25 Тл.

Перевести 0,25 Тл в Гс, кА/м и Э. Выполнить обратный переход от кА/м и Э к Тл и Гс.

### **Решение**

$$0,25 \text{ Тл} \cdot 10^4 = 2500 \text{ Гс} = 2500 \text{ Э};$$

$$0,25 \text{ Тл} / (4\pi \cdot 10^{-7}) = 0,25 \text{ Тл} \cdot 800000 = 200000 \text{ А/м} = 200 \text{ кА/м};$$

$$200000 \text{ А/м} \cdot (4\pi \cdot 10^{-3}) = 200000 \text{ А/м} / 80 = 2500 \text{ Э}.$$

### **Решение (обратный переход)**

$$2500 \text{ Э} / (4\pi \cdot 10^{-3}) = 2500 \text{ Э} \cdot 80 = 200000 \text{ А/м} = 200 \text{ кА/м}.$$

$$200 \text{ кА/м} = 200000 \text{ А/м} = 200000 \cdot (4\pi \cdot 10^{-7}) = 200000 / 800000 = 0,25 \text{ Тл};$$

$$2500 \text{ Гс} = 2500 \text{ Э} = 0,25 \text{ Тл} / 10^4.$$

## **2.2. Силы, действующие на частицы при магнитной сепарации**

При движении разделяемых частиц через рабочую зону магнитного сепаратора на частицы действуют силы, которые можно разделить на магнитную силу и на механические силы.

Магнитная сила является основной силой, обеспечивающей процесс магнитного обогащения. Она действует только на частицы, имеющие магнитные свойства.

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  $\Sigma F_{\text{мех}}$ :

$$F_m^{(M)} > \Sigma F_{\text{мех}}^{(M)}; \quad F_m^{(H)} < \Sigma F_{\text{мех}}^{(H)}, \quad (2.7)$$

где  $F_m^{(M)}$  и  $F_m^{(H)}$  – магнитная сила, действующая на магнитную и немагнитную частицы, Н;  $\Sigma F_{\text{мех}}^{(M)}$  и  $\Sigma F_{\text{мех}}^{(H)}$  – равнодействующая механических сил, действующая на магнитную и немагнитную частицы, Н.

Для анализа процесса разделения магнитных и немагнитных частиц в магнитном поле необходимо уметь рассчитывать магнитную и механические силы, действующие на частицы различной крупности и с разными физическими свойствами. При расчётах динамики движения частиц в обогащительных аппаратах часто используют удельные силы (силы, отнесённые к единице массы). В дальнейшем силу и удельную силу будем обозначать буквами  $F$  и  $f$ .

Среди механических сил выделим следующие основные силы.

1. Сила тяжести в воздухе и сила тяжести, уменьшенная на величину силы Архимеда, Н:

$$F_g = mg; \quad F_g = mg \frac{\rho - \rho_c}{\rho}, \quad (2.8)$$

где  $m$  – масса частицы, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, равное  $9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $\rho$  и  $\rho_c$  – плотность частицы и среды,  $\text{кг/м}^3$ .

Удельная сила тяжести и сила тяжести, уменьшенная на величину силы Архимеда, Н/кг:

$$f_g = g; \quad f_g = g \frac{\rho - \rho_c}{\rho}, \quad (2.9)$$

Размерностью удельной силы является Н/кг, что эквивалентно  $\text{м/с}^2$ . Поэтому удельная сила тяжести может равняться ускорению свободного падения.

В сепараторах с верхней подачей продукта при угле поворота барабана от  $0$  до  $90^\circ$  нормальная к поверхности барабана составляющая силы тяжести будет направлена к оси барабана и будет совпадать с направлением действия магнитной силы. Это будет способствовать удержанию частиц на барабане. При угле поворота барабана от  $90$  до  $180^\circ$  нормальная к поверхности барабана составляющая силы тяжести будет направлена от оси барабана. Это будет способствовать отрыву частиц от барабана. В аппаратах с движением материала под магнитной системой (нижняя подача) извлечение частиц в магнитную фракцию будет при условии, что магнитная сила  $F_m$  превысит силы тяжести  $F_g$ .

2. Центробежная сила и удельная центробежная сила, возникающая при движении материала по криволинейной траектории (транспортирующая поверхность, барабан):

$$\text{при } d/R < 0,5 \quad F_{\text{ц}} = m \frac{v^2}{R}; \quad f_{\text{ц}} = \frac{v^2}{R}, \quad (2.10)$$

$$\text{при } d/R > 0,5 \quad F_{\text{ц}} = m \frac{v^2 (R + 0,5d)^2}{R^3}; \quad f_{\text{ц}} = \frac{v^2 (R + 0,5d)^2}{R^3}, \quad (2.11)$$

где  $v$  – скорость вращения барабана сепаратора или движения частицы по криволинейной поверхности, м/с;  $R$  – радиус барабана или криволинейной поверхности, м;  $d$  – диаметр частицы, м.

Центробежная сила стремится оторвать частицу от барабана сепаратора с верхней подачей и «прижать» частицу при её движении по криволинейной поверхности к дну ванны в мокром барабанном сепараторе или к поверхности полюсного наконечника валкового сепаратора. Поэтому в стандартных сепараторах центробежная сила конкурирует с магнитной силой.

3. Сила адгезии или молекулярного сцепления (прилипания немагнитной частицы к магнитной или к барабану сепаратора), по Б. В. Дерягину, соответственно, для двух сферических частиц различного и одинакового размера:

$$F_{\text{ц}} = \frac{4\pi A \sigma r_1 r_2}{r_1 + r_2}; \quad F_{\text{ц}} = \pi A \sigma d, \quad (2.12)$$

где  $A$  – коэффициент, учитывающий площадь соприкосновения частиц, их влажность и др.;  $\sigma$  – поверхностное натяжение частиц на границе их раздела с окружающей средой (воздухом), Н/м;  $r$  – радиус частицы, м.

Силы адгезии имеют большое значение при сепарации мелкодробленных продуктов. Немагнитные пылевидные частицы прилипают к магнитным частицам и к транспортирующей поверхности, попадая с ними в магнитный продукт, значительно ухудшают качество концентрата. Для борьбы с этим явлением сепарацию мелкодробленных продуктов осуществляют в центробежном режиме (повышенные скорости вращения барабанов сепараторов), дополнительно применяя аспирационные системы для удаления пылевидных частиц.

В инженерных расчётах динамики перемещения частиц в магнитных сепараторах в связи со сложностью оценки величины силы адгезии её, как правило, не учитывают.

4. Сила сопротивления воды (среды) движению частицы, в зависимости от крупности частиц, определяемая по законам Стокса, Аллена, Риттингера.

Сила и удельная сила вязкостного сопротивления воды (среды) движению частицы для частиц крупностью 0-0,1 мм по Стоксу:

$$F_{\text{с}} = 3\pi\mu v d; \quad f_{\text{с}} = 18 \frac{\mu v}{d^2 \rho}, \quad (2.13)$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости (для воды  $\mu=10^{-3}$  Па·с);  $v$  – скорость движения частицы, м/с.

Сила и удельная сила динамического сопротивления воды (среды) движению частицы для частиц крупностью более 2 мм, по Риттингеру:

$$F_c = \frac{\pi}{16} \rho_b d^2 v^2; \quad f_c = \frac{3}{8} \cdot \frac{\rho_b v^2}{\rho d}, \quad (2.14)$$

Сила и удельная сила для частиц промежуточной крупности от 0,1 до 2 мм, когда значимо влияет как вязкостное, так и динамическое сопротивление воды (среды) движению частицы, по Аллену:

$$F_c = \frac{5 \cdot \pi}{8 \sqrt{\text{Re}}} \rho_b d^2 v^2; \quad f_c = \frac{15}{4} \cdot \frac{\rho_b v^2}{\rho d \sqrt{\text{Re}}}, \quad (2.15)$$

где  $\text{Re}$  – параметр Рейнольдса, определяемый по формуле:

$$\text{Re} = \frac{\rho_b v d}{\mu}. \quad (2.16)$$

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 при мокрой магнитной сепарации, поэтому её всегда учитывают при расчётах динамики перемещения частиц.

Кроме вышеперечисленных сил на частицы могут действовать и другие силы, например сила трения и инерционная сила при виброперемещении частицы через рабочую зону магнитного сепаратора и другие силы.

Силу трения следует учитывать при перемещении единичных частиц, чего не происходит в промышленных магнитных сепараторах, в рабочей зоне которых происходит массовое перемещение частиц. Поэтому силу трения, как правило, не учитывают.

Инерционную силу следует учитывать, если частицы движутся через рабочую зону сепаратора с помощью вибрационного питателя.

### 2.3. Магнитная сила и её составляющие

Магнитные силы, как и электрические, иногда называют пондеромоторными силами. Термин «пондеромоторная сила» введён в средние века и означает силу, способную перемещать «не весомые» тела. В настоящее время термин «пондеромоторная магнитная сила» следует признать устаревшим, так как природа возникновения магнитной силы достаточно изучена. Поэтому используется термин «магнитная сила».

*Магнитная сила* – сила, действующая на тела (неподвижные или движущиеся), обладающие магнитными свойствами, и на движущиеся электрические заряды. Магнитная сила вызывает перемещение этих тел или изменение их траектории движения.

Практически во всех магнитных сепараторах магнитная сила вызывает притяжение частиц, обладающих магнитными свойствами, к магнитной системе. Поэтому в процессах магнитного обогащения минеральных и других частиц магнитную силу иногда называют «магнитной силой притяжения».

В электродинамических сепараторах магнитная сила, наоборот, вызывает отталкивание электропроводных частиц, в которых возникли вихревые токи, от магнитной системы сепаратора.

В дальнейшем под магнитной силой будем подразумевать магнитную силу притяжения, действующую на частицы, обладающие магнитными свойствами. При этом в общем виде под магнитными свойствами частицы подразумевают её взаимодействие (магнитные свойства имеются) или невзаимодействие (магнитные свойства низкие) с магнитным полем.

Магнитные поля бывают однородные и неоднородные. Для первых напряженность магнитного поля для разных точек рабочей зоны одинакова по величине и направлению ( $\text{grad}H=0$ ), для вторых – напряженность отличается для разных точек рабочей зоны ( $\text{grad}H>0$ ). Величина  $\text{grad}H$  характеризует изменение величины напряжённости магнитного поля в заданном направлении. В однородном магнитном поле магнитная сила равна нулю и 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 [13]:

$$U = - \int_V \frac{\mu_0 \alpha H^2}{2} dV, \quad (2.17)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума или магнитная постоянная, Гн/м,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ;  $\alpha$  – объёмная магнитная восприимчивость частицы (характеризует магнитные свойства частицы), безразмерная величина;  $H$  – напряжённость магнитного поля, А/м;  $V$  – объём частицы, м<sup>3</sup>.

Сила, действующая на тело, может быть выражена через  $\text{grad}U$  с обратным знаком, тогда

$$F_M = -\text{grad}U = \text{grad} \int_V \frac{\mu_0 \alpha H^2}{2} dV, \quad (2.18)$$

Включая знак  $\text{grad}$  в подынтегральное выражение и допуская, что в пределах объёма частицы объёмная магнитная восприимчивость постоянна, получим:

$$F_M = \mu_0 \alpha \int_V H \text{grad}H dV, \quad (2.19)$$

где  $\text{grad}H$  – производная  $dH/dx$  в направлении наибольшего возрастания  $H$ , А/м<sup>2</sup>.

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

$$F_M = \mu_0 \alpha V H \text{grad}H. \quad (2.20)$$

При расчётах динамики движения частиц в обогащательных аппаратах часто используют удельные магнитные силы. Удельное значение магнитной силы, отнесенной к единице массы при  $V \rightarrow 0$ , Н/кг:

$$f_M = F_M/m = \mu_0 \alpha V H \text{grad}H / (V\rho) = \mu_0 \chi H \text{grad}H, \quad (2.21)$$

где  $\chi$  – удельная магнитная восприимчивость (характеризует магнитные свойства частицы), равная  $\alpha/\rho$ , м<sup>3</sup>/кг;  $\rho$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>.

В формулах (2.20) и (2.21) в качестве силовой характеристики магнитного поля (в воздухе или в воде) использована напряжённость магнитного поля. Если в качестве силовой характеристики магнитного поля (в воздухе или в воде) использовать индукцию магнитного поля ( $B$ ), то магнитную силу и удельную магнитную силу можно рассчитать по формулам:

$$F_m = \alpha V B \text{grad} B / \mu_0; \quad (2.22)$$

$$f_m = \chi B \text{grad} B / \mu_0. \quad (2.23)$$

В работе [13] отмечено, что использование формулы (2.21) для нахождения магнитной силы даёт несколько заниженный результат величины магнитной силы, действующей на крупные частицы. Это подтвердили опыты по проверке магнитной силы на экспериментальной установке. Поэтому с учётом крупности частиц в расчетные формулы необходимо добавлять поправочный коэффициент  $a$ :

$$f_m = a \mu_0 \chi H \text{grad} H. \quad (2.24)$$

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.

Анализ формул (2.20) – (2.24) для расчета магнитной силы притяжения показывает, что на неё влияют две составляющие.

*Первая составляющая* характеризует конструкцию магнитной системы –  $H \text{grad} H$  ( $B \text{grad} B$ ). Величину  $H \text{grad} H$  ( $B \text{grad} B$ ) принято называть *удельной магнитной силой магнитной системы*. Она зависит в основном от напряженности магнитного поля на поверхности полюсов, от расстояния между полюсами, размеров рабочей зоны сепаратора, формы полюсов.

*Вторая составляющая* характеризует свойства разделяемых частиц – магнитные ( $\alpha$ ,  $\chi$ ) и геометрические (крупность, форма). При этом влияние крупности частицы на величину действующей на частицу магнитной силы указывает на то, что при магнитном обогащении разделение будет происходить не только по магнитным свойствам, но и по крупности.

Для разделения частиц на магнитные и немагнитные необходимо создать определенное значение магнитной силы, превышающей противодействующие силы. При обогащении сильномагнитных руд с высокими магнитными свойствами ( $\alpha$ ,  $\chi$ ) 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  $H \text{grad} H$ .

## 2.4. 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 обычно применяют *открытые магнитные системы*, а в сепараторах для слабомагнитных руд – *замкнутые магнитные системы*. Первые характеризуются расположением рабочей зоны разделения с одной стороны от полюсов (рис. 2.1), вторые – расположением рабочей зоны между полюсами (рис. 2.4).

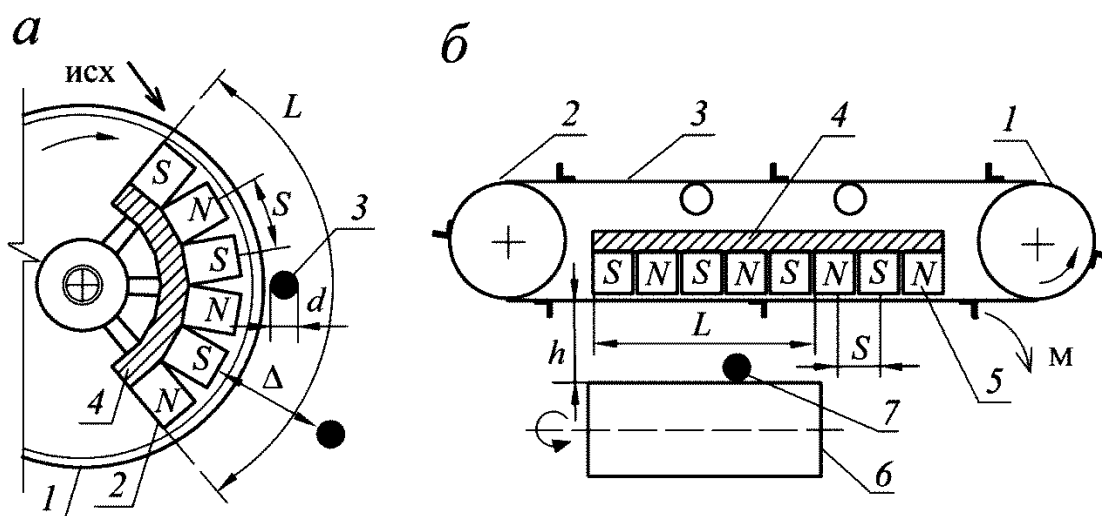


Рис. 2.1. Схемы открытых многополюсных магнитных систем сепараторов:  
а – барабанный сепаратор с верхней подачей материала: 1 – барабан; 2 – полюса; 3 – частица руды; 4 – магнитопровод; б – подвесной железоотделитель с нижней подачей материала: 1 – приводной барабан; 2 – натяжной барабан; 3 – бесконечная лента; 4 – магнитопровод; 5 – полюса; 6 – конвейер, транспортирующий исходный продукт; 7 – частица руды.  
 $L$  – длина рабочей зоны;  $\Delta$  – расстояние от поверхности магнитной системы (от полюса) до частицы;  $S$  – шаг полюсов;  $d$  – размер частицы;  $h$  – высота рабочей зоны

*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.

Для оценки возможности разделения частиц с известными магнитными свойствами необходимо знать закономерности изменения индукции магнитного поля в рабочей зоне сепаратора. Зная индукцию магнитного поля на поверхности рабочего органа сепаратора (барабане, зубце валка) и зависимость изменения (снижения) индукции при удалении от полюса, можно рассчитать магнитную силу притяжения  $F_m$  частиц с заданными магнитными свойствами.

### 2.4.1. Магнитное поле сепараторов для сильномагнитных руд с открытыми многополюсными системами

Сепараторы с открытыми многополюсными системами в основном применяются для обогащения сильномагнитных руд и продуктов. Наибольшее распространение получили барабанные сепараторы с верхней подачей с криволинейной магнитной системой и подвесные железоотделители с плоской магнитной системой (см. рис. 2.1).

Рабочая зона разделения сепараторов с открытыми многополюсными системами характеризуется длиной  $L$ , равной расстоянию от начала участка, где начинается притяжение магнитных частиц, до участка, где начинается разгрузка магнитных частиц (см. рис. 2.1). Рабочая зона характеризуется высотой  $h$ . Для сепараторов с нижней подачей материала высота  $h$  ограничена геометрически – это может быть расстояние между поверхностью барабана и дном ванны для мокрого барабанного сепаратора или расстояние от ленты конвейера до ленты подвесного железоотделителя (см. рис. 2.1, б).

Для сепараторов с верхней подачей высота  $h$  геометрически не ограничена и нет принципиальных ограничений для транспортирования материала через рабочую зону разделения. Ограничения по крупности связаны только с возможностью создания магнитных полей, достаточных для удерживания крупных кусков руды и с наличием кусков, которые можно выделить в конечный продукт (концентрат или хвосты).

Сепараторы с открытым магнитными системами обычно имеют большую длину и высоту рабочей зоны по сравнению с другими сепараторами. В настоящее время сухую магнитную сепарацию применяют уже после первой стадии дробления, что соответствует крупности разделяемого материала 300 мм.

Открытые магнитные системы бывают криволинейными (см. рис. 2.1, а) и прямолинейными (см. рис. 2.1, б) и состоят из ряда полюсов чередующейся полярности.

На характеристику поля сепараторов с многополюсными магнитными системами в основном влияют напряженность магнитного поля на поверхности полюсов и шаг полюсов  $S$ . Кроме этого, характеристика магнитного поля будет зависеть от геометрических размеров полюсов, магнитных свойств постоянных магнитов, размера межполюсного зазора, радиуса барабана сепаратора и других конструктивных особенностей магнитной системы.

Одной из важнейших характеристик, определяющих магнитную силу, является напряженность магнитного поля на поверхности полюсов, которая в основном определяется видом материала для изготовления постоянных магнитов и их размерами. Напряженность поля магнитных сепараторов с системами из постоянных магнитов из феррита бария обычно не превышает 120 кА/м. Для увеличения напряжённости магнитного поля используют постоянные редкоземельные магниты из самарий-кобальта, неодим-железо-бора и др., например,  $\text{SmCo}_5$ ,  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ,  $\text{SmTiFe}_{11}$  (напряжённость до 1600 кА/м). Напряжённость магнитного поля сепараторов с открытой электромагнитной системой обычно не превышает 160 кА/м.

Для увеличения магнитной силы между основными полюсами устанавливают дополнительные корректирующие магниты из материалов с повышенной энергией для «выталкивания» магнитного поля в рабочую зону. При этом смежные стороны основного и дополнительного полюсов однополярные.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что для открытой многополюсной системы изменение напряженности и индукции магнитного поля по нормали к поверхности полюсов определяется равенством

$$H_x = H_0 e^{-cx}, \quad B_x = B_0 e^{-cx}, \quad (2.25)$$

где  $H_x$  и  $B_x$  – напряженность и индукция магнитного поля на расстоянии  $x$  от полюса, А/м и Тл;  $H_0$  и  $B_0$  – напряженность и индукция магнитного поля на поверхности полюса ( $x=0$ ), А/м и Тл;  $c$  – коэффициент неоднородности магнитного поля,  $\text{м}^{-1}$ .

Используя зависимости (2.25), найдём  $\text{grad}H$  и  $\text{grad}B$ :

$$\text{grad}H = dH/dx = cH_0 e^{-cx}, \quad \text{grad}B = dB/dx = cB_0 e^{-cx}. \quad (2.26)$$

Знак « $\rightarrow$ » в равенствах (2.26) опускают. Он указывает на уменьшение напряжённости магнитного поля при удалении от магнитной системы.

Тогда удельная магнитная сила магнитной системы

$$H \text{grad}H = cH_0^2 e^{-2cx}, \quad B \text{grad}B = cB_0^2 e^{-2cx}. \quad (2.27)$$

Вид зависимостей (2.25) – (2.27) указывает на то, что при удалении от полюса магнитной системы напряжённость и индукция магнитного поля,  $\text{grad}H$ ,  $\text{grad}B$ , и магнитная сила снижаются.

Коэффициент неоднородности магнитного поля зависит от шага полюсов.

*Шагом полюсов многополюсной магнитной системы называется расстояние между центрами двух соседних разноименных полюсов (см. рис. 2.1).*

Теоретическими исследованиями установлено, что при расположении полюсов по цилиндрической поверхности (внутри барабана) коэффициент неоднородности поля связан с шагом полюсов соотношением

$$c = \pi/S + 1/R, \quad S = \pi/(c - 1/R). \quad (2.28)$$

где  $S$  – шаг полюсов многополюсной магнитной системы;  $R$  – радиус цилиндрической поверхности (обечайки барабана), м.

При расположении полюсов в плоскости (подвесной железоотделитель,  $R \rightarrow \infty$ ) коэффициент неоднородности поля связан с шагом полюсов соотношением

$$c = \pi/S, \quad S = \pi/c. \quad (2.29)$$

Из соотношений (2.28) и (2.29) следует, что чем меньше шаг полюсов многополюсной магнитной системы, тем выше коэффициент неоднородности магнитного поля и тем больше снижается напряжённость магнитного поля при удалении от полюса. Поэтому если частицы исходного продукта движутся вблизи полюсов и их размер относительно мал, то можно использовать магнитную систему с малым шагом полюсов (меньше масса магнитной системы). При обогащении более крупного материала или при движении частиц на значительном расстоянии от магнитной системы (нижняя подача) необходимо увеличить шаг полюсов.

Для барабанных сепараторов на коэффициент неоднородности магнитного поля влияет радиус барабана. Чем больше радиус барабана сепаратора, тем меньше снижается напряжённость магнитного поля при удалении от полюса. Поэтому в барабанных магнитных сепараторах с нижней подачей более высокая магнитная сила достигается в сепараторах с большим диаметром барабана. Например, промышленные сепараторы с диаметром барабана 1,5 м обеспечивают меньшую массовую долю железа магнетитового в хвостах по сравнению с сепараторами с диаметром барабана 0,9 м.

На характеристику поля открытых магнитных систем, кроме шага полюсов оказывает влияние ширина полюса ( $b$ ), зазор между полюсами ( $a$ ) и конфигурация полюса. Для систем из феррита бария соотношение  $b:a$  обычно изменяется от 3:1 до 5:1. При использовании редкоземельных магнитов обычно соотношение  $b:a$  выше. Оптимальное соотношение  $b:a$  обеспечивает более равномерное магнитное поле вдоль чередующихся полюсов магнитной системы (без резкого увеличения или уменьшения над зазорами между полюсами). При

чрезмерном увеличении зазора между полюсами может нарушиться процесс транспортирования магнитных частиц барабаном вдоль магнитной системы.

На рис. 2.2 приведены экспериментальные значения и теоретические зависимости снижения индукции магнитного поля (над центром полюса) при удалении по нормали от поверхности барабанов промышленного сепаратора ПБМ-П-90/250 (постоянные магниты из феррита бария), лабораторного сепаратора 120Т-СЭМ (электромагнит,  $I=10$  А) и лабораторного сепаратора ПБС-33/18 (постоянные редкоземельные магниты из Nd-Fe-B). Экспериментальные значения индукции определены с помощью тесламетра.

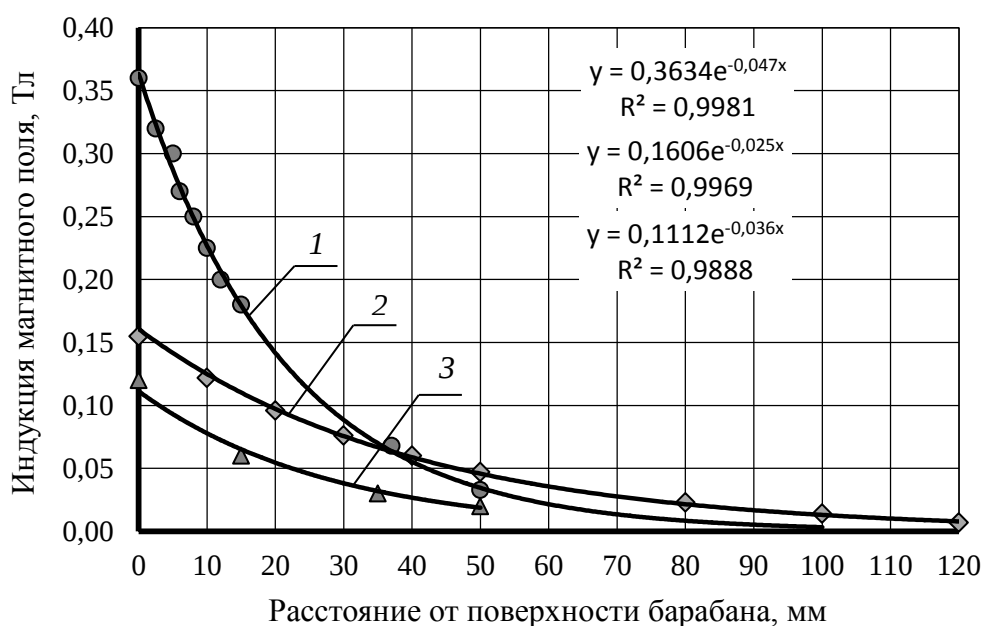


Рис. 2.2. Зависимость индукции магнитного поля от расстояния до полюса магнитной системы:  
1 – ПБС-33/18; 2 – ПБМ-90/250; 3 – 120Т-СЭМ

Экспериментальные точки достаточно точно аппроксимируются экспоненциальными уравнениями (2.25). Экспериментальные и теоретические значения индукции магнитного поля  $B_0$  на поверхностях барабанов рассмотренных сепараторов практически равны 0,36 и 0,363 Тл для сепаратора ПБС-33/18; 0,155 и 0,16 Тл – для сепаратора ПБМ-П-90/250; 0,12 и 0,11 Тл – для сепаратора 120Т-СЭМ. Расчёт шага полюсов рассмотренных сепараторов с помощью формулы (2.28) также указывает на возможность использования теоретической формулы. Фактический и рассчитанный шаг полюсов  $S$  равен 70 и 76,7 мм для сепаратора ПБС-33/18; 130 и 137,9 мм – для сепаратора ПБМ-П-90/250; 102 и

104,9 мм – для сепаратора 120Т-СЭМ. Чем меньше величина шага полюсов, тем быстрее снижается индукция магнитного поля при удалении от полюса.

Необходимо отметить, что формулы (2.25)-(2.29) являются теоретическими и справедливы при использовании полюсов специальной формы, при большом количестве полюсов, при определённых соотношениях геометрических размеров полюсов и шага полюсов и других особенностей магнитной системы. Фактический шаг полюсов для всех рассмотренных в примере сепараторов (см. рис. 2.2) несколько ниже, чем рассчитанный по теоретической формуле. При определённой конструкции магнитной системы шаг полюсов, определяемый по формулам (2.28) и (2.29), может значительно отличаться от фактического значения. В ряде случаев при сильном снижении индукции магнитного поля при удалении от полюса (при использовании специальных систем из редкоземельных постоянных магнитов) в формулу (2.25) можно ввести дополнительный коэффициент (показатель степени  $x$ ):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \ln(B_{xi}) = \ln(B_0)N - c \sum_{i=1}^N x_i; \\ \sum_{i=1}^N [\ln(B_{xi})x_i] = \ln(B_0) \sum_{i=1}^N x_i - c \sum_{i=1}^N x_i^2, \end{cases}$$

где  $i$  и  $N$  – номер и количество экспериментальных данных (в примере  $N=9$ ).

Решением системы уравнений будут являться неизвестные величины  $\ln(B_0)$  и  $c$ . Для нахождения  $\ln(B_0)$  и  $c$  рассчитываем необходимые суммы:

$$\sum x_i = 450; \sum x_i^2 = 36300; \sum (\ln(B_{xi})) = -27,76; \sum (\ln(B_{xi}) \cdot x_i) = -1734,71.$$

Коэффициент неоднородности магнитного поля  $c = 0,025 \text{ мм}^{-1}$ . Величина  $\ln(B_0) = -1,83$ . Для нахождения  $B_0$  число « $e$ » возводим в степень  $\ln(B_0)$  и получаем  $B_0 = 0,16 \text{ Тл}$ .

Используя формулу (2.28), находим шаг полюсов (при  $R=450 \text{ мм}$  для сепаратора ПБМ-П-90/250):  $S = 137,9 \text{ мм}$ .

Теоретическое значение индукции на поверхности барабана на дне ванны (50 мм) рассчитываем по уравнению (2.25) при найденных значениях  $B_0$  и  $c$  и величин  $x=0 \text{ мм}$  и  $x=50 \text{ мм}$ . Получим:  $B_0 = 0,16 \text{ Тл}$  и  $B_{50} = 0,046 \text{ Тл}$ .

#### 2.4.2. Магнитная сила, действующая на частицу с заданным размером в рабочей зоне сепаратора

Формулы (2.21)-(2.23) можно использовать при расчёте магнитной силы, действующей на частицу с бесконечно малым объёмом ( $V \rightarrow 0$ ). Однако при разделении в магнитных сепараторах частицы имеют размер, который необходимо учитывать при расчёте магнитной силы. Кроме этого частицы движутся через зону разделения на различном расстоянии от поверхности рабочего элемента сепаратора (барабана, вала). Поэтому для более точного расчёта магнитной силы необходимо учитывать размер частицы и расстояние от неё до поверхности магнитной системы сепаратора.

Найдём удельную магнитную силу, действующую на частицу известного объёма, используя формулу (2.19):

$$f_m = \frac{F_m}{m} = \frac{F_m}{\rho V} = \frac{\mu_0 \chi}{\rho V} \int_V H \text{grad} H dV. \quad (2.31)$$

Преобразуем формулу (2.31), приняв форму частицы в виде куба, что позволяет заменить  $V$  на линейный размер частицы  $d$ . Заменив  $\chi$  на  $\chi \cdot \rho$ , найдём удельную магнитную силу:

$$f_m = \frac{\mu_0 \chi}{d} \int_d H \text{grad} H dx, \quad (2.32)$$

где  $x$  – расстояние от магнитной системы в направлении, нормальном к её поверхности, м.

Получим формулу для удельной магнитной силы, действующей на частицу с размером  $d$ , находящуюся на расстоянии  $\Delta$  от поверхности магнитной системы (см. рис. 2.1, а). Для этого подставим в формулу (2.32) поправочный коэффициент  $a$  из формулы (2.24) и величину  $H_{\text{grad}}H$  из формулы (2.27):

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

В качестве пределов интегрирования используются расстояния  $\Delta$  и  $\Delta+d$  (см. рис. 2.1). Расстояние  $\Delta$  – расстояние от поверхности магнитной системы (от полюса) до частицы (до ближнего её края). На этом расстоянии магнитная сила будет максимальной. Расстояние  $\Delta+d$  – расстояние от поверхности магнитной системы (от полюса) до частицы плюс размер частицы (расстояние до дальнего края частицы). На этом расстоянии магнитная сила будет минимальной.

Подставляя пределы интегрирования, получаем конечную формулу:

$$f_m = \frac{a\mu_0\chi H_0^2}{2d} e^{-2c\Delta} (1 - e^{-2cd}). \quad (2.33)$$

Если в качестве силовой характеристики магнитного поля (в воздухе или в воде) использовать индукцию магнитного поля ( $B$ ), то удельную магнитную силу можно рассчитать по формуле:

$$f_m = \frac{a\chi B_0^2}{2\mu_0 d} e^{-2c\Delta} (1 - e^{-2cd}). \quad (2.34)$$

Следует уточнить, что формулы (2.33) и (2.34) справедливы для условия однородности магнитных свойств частицы внутри её объёма.

Анализ формулы (2.33) показывает, что при увеличении  $\Delta$  и  $d$  магнитная сила снижается по экспоненциальному закону, тем быстрее, чем больше коэффициент  $c$  или меньше шаг полюсов  $S$ . При граничных условиях удельная магнитная сила:

$$\begin{aligned} f_m &= a\mu_0\chi H_0^2 (1 - e^{-2cd}) / 2d, & \text{при } \Delta \rightarrow 0; \\ f_m &= 0, & \text{при } \Delta \rightarrow \infty; \\ f_m &= \mu_0\chi H_0^2 c, & \text{при } \Delta \rightarrow 0 \text{ и при } d \rightarrow 0; \\ f_m &= 0, & \text{при } d \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

Наличие в формуле (2.33) значения крупности частицы в качестве фактора указывает на то, что при обогащении в магнитных сепараторах кроме разделения по магнитным свойствам происходит и разделение по крупности. При

этом влияние крупности частиц на магнитную силу будет зависеть от способа подачи материала в рабочую зону сепаратора – верхняя или нижняя подача.

Другими основными факторами, влияющими на магнитную силу, являются магнитная восприимчивость частицы, напряжённость (индукция) магнитного поля на поверхности магнитной системы и коэффициент неоднородности магнитного поля, зависящий от шага полюсов многополюсной магнитной системы. Напряжённость (индукция) магнитного поля на поверхности магнитной системы будет зависеть от свойств постоянных магнитов или характеристик электромагнита. Чем выше магнитная восприимчивость частиц и напряжённость поля на поверхности магнитной системы, тем выше будет магнитная сила. Зависимость магнитной силы от шага полюсов (от коэффициента неоднородности магнитного поля) носит экстремальный характер, поэтому можно говорить об оптимальном шаге полюсов.

### **Пример**

Частица с размером  $d=30$  мм и с удельной восприимчивостью  $\chi=4\cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг находится на неподвижном конвейере под подвесным железоотделителем с плоской многополюсной системой (см. рис 2.1, б). Расстояние  $h$  между лентой конвейера и рабочей поверхностью магнитной системы равно 0,15 м. Напряжённость магнитного поля на рабочей поверхности магнитной системы равна 160 кА/м. Шаг полюсов магнитной системы железоотделителя равен 0,25 м.

Рассчитать удельную магнитную силу, действующую на частицу, используя значения напряжённости и индукции магнитного поля.

Сделать вывод: притянется ли частица к магнитной системе железоотделителя? Принять, что на частицу значимо действуют сила тяжести и магнитная сила.

### **Решение**

При расчётах значения всех величин использовать в системе СИ.

По формуле (2.29) рассчитываем коэффициент неоднородности магнитного поля,  $c=12,57$  м<sup>-1</sup>. Расстояние от рабочей поверхности магнитной системы до частицы находится путём вычитания из расстояния между лентой конвейера и рабочей поверхностью магнитной системы значения высоты (размера) частицы:  $\Delta=h-d=0,15-0,03=0,12$  м. По формуле (2.33) находим значение удельной магнитной силы, действующей на частицу, по величине напряжённости магнитного поля,  $f_m(H)=11,13$  Н/кг. Принимаем коэффициент  $a=2$  исходя из крупности частицы.

По формуле (2.34) находим значение удельной магнитной силы, действующей на частицу, по величине индукции магнитного поля. Переводим заданное значение напряжённости в индукцию магнитного поля:  $160$  кА/м= $0,2$  Тл. Рассчитываем удельную магнитную силу ( $f_m(B)=11,13$  Н/кг) и сравниваем результаты:  $f_m(H)=f_m(B)$ .

Сравниваем удельную магнитную силу и ускорение свободного падения: если  $f_m > g$ , то частица притянется к магнитной системе железоотделителя, если  $f_m < g$ , то частица оста-

нется на ленте конвейера. Такое сравнение допустимо, так как размерности Н/кг и м/с<sup>2</sup> эквивалентны.

В рассмотренном примере частица притянется к магнитной системе железоотделителя, так как  $11,13 > 9,81$ .

### 2.4.3. Оптимизация шага полюсов открытой многополюсной системы

Максимальная магнитная сила, действующая на частицу с размером  $d$ , находящуюся на расстоянии  $\Delta$  от поверхности магнитной системы сепаратора (от полюса), зависит от коэффициента неоднородности магнитного поля или от шага полюсов многополюсной магнитной системы. Величину шага полюсов, обеспечивающего максимальную магнитную силу, действующую на частицу, можно определить следующим образом. Возьмём частную производную формулы (2.33) или (2.34) по  $c$  и приравняем её к нулю (исследуем на экстремум):

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

Из полученного равенства выразим «оптимальное» значение коэффициента неоднородности магнитного поля  $c_{\text{опт}}$ :

$$c_{\text{опт}} = \frac{\ln[(\Delta+d)/\Delta]}{2d}. \quad (2.35)$$

Используя соотношения (2.28) и (2.29), найдём «оптимальное» значение шага полюсов  $S_{\text{опт}}$ :

$$S_{\text{опт}} = \frac{2\pi dR}{R \cdot \ln(1+d/\Delta) - 2d}; \quad S_{\text{опт}} = \frac{2\pi d}{\ln(1+d/\Delta)}. \quad (2.36)$$

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 (2.36) для достижения максимальной магнитной силы при меньшей массе магнитной системы, а следовательно, при меньшей цене сепаратора. Это следует считать предварительной оптимизацией шага полюсов.

#### Сухие барабанные сепараторы с верхней подачей материала

При обогащении в сухих барабанных сепараторах с верхней подачей разделяемый материал находится в непосредственной близости от магнитной си-

стемы. Расстояние  $\Delta$  определяется толщиной ленты или барабана и минимально возможным зазором между поверхностью полюсов и барабаном.

На рис. 2.3 приведены зависимости удельной магнитной силы от шага полюсов при различной крупности частиц для барабанного сепаратора с верхней подачей материала. Расчёт выполнен по формуле (2.34) при следующих постоянных исходных данных: удельная магнитная восприимчивость частицы  $\chi=0,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ ; радиус барабана  $R=450 \text{ мм}$ ; индукция на поверхности магнитной системы  $B_0=0,21 \text{ Тл}$  (при  $\Delta=10 \text{ мм}$  –  $B_{10}=0,164 \text{ Тл}$ ; при  $\Delta=5 \text{ мм}$  –  $B_5=0,185 \text{ Тл}$ ).

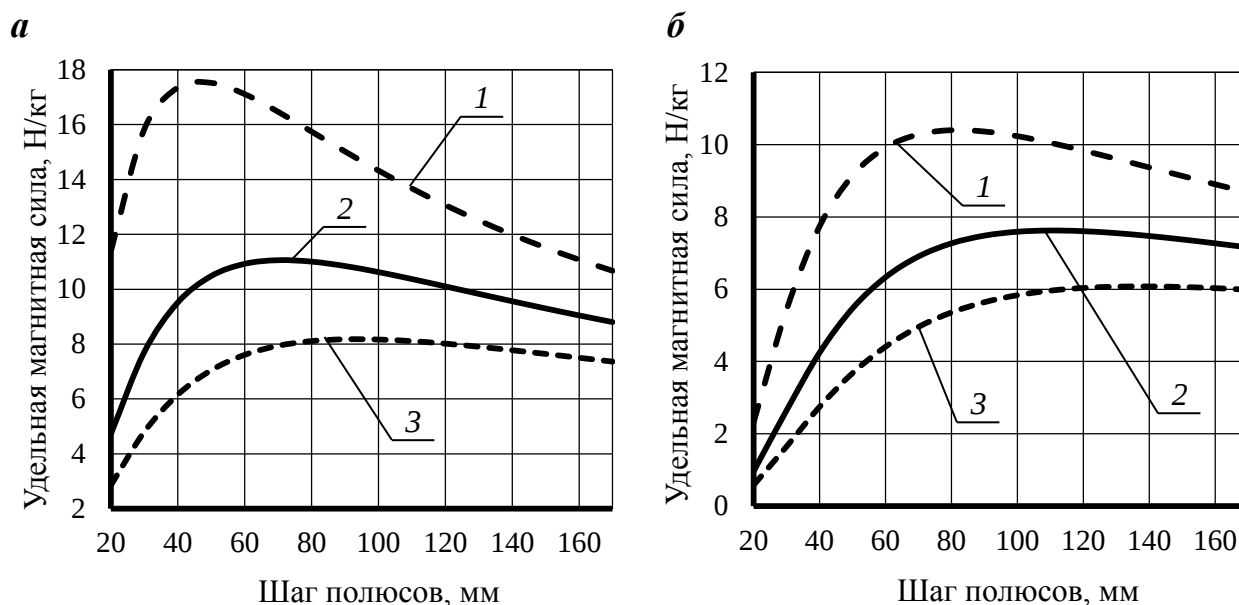


Рис. 2.3. Зависимость удельной магнитной силы от шага полюсов при различной крупности частиц для сепаратора с верхней подачей материала: *а* – расстояние  $\Delta=5 \text{ мм}$ ; *б* – расстояние  $\Delta=10 \text{ мм}$ ; 1 –  $d=5 \text{ мм}$ ; 2 –  $d=15 \text{ мм}$ ; 3 –  $d=25 \text{ мм}$ ; удельная магнитная восприимчивость  $\chi=0,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ ; радиус барабана  $R=450 \text{ мм}$ ; индукция  $B_0=0,21 \text{ Тл}$

Зависимости, приведённые на рис. 2.3, носят экстремальный характер. Максимальное значение удельной магнитной силы в зависимости от крупности частиц соответствует «оптимальному» шагу полюсов, рассчитанному по формуле (2.36). По полученным зависимостям можно сделать следующие основные теоретические выводы по выбору магнитного барабанного сепаратора с верхней подачей для сухого обогащения.

1. При уменьшении крупности обогащаемого материала можно использовать сепаратор с меньшим шагом полюсов. Такая магнитная система будет иметь меньшую массу, следовательно, сепаратор будет иметь меньшую цену.

2. Уменьшение расстояния  $\Delta$  между поверхностью магнитной системы и рабочей поверхностью футерованного барабана приводит к возможности использования более дешёвого сепаратора с меньшим шагом полюсов. Однако чрезмерное уменьшение расстояния  $\Delta$ , которое определяется воздушным зазором между магнитной системой и обечайкой барабана, толщиной обечайки и футеровки барабана, приводит к снижению механической надёжности сепаратора.

3. Функции, приведённые на рис. 2.3, не симметричны относительно экстремума. При снижении шага полюсов менее оптимального значения удельная магнитная сила уменьшается значительно быстрее, чем при увеличении шага полюсов выше оптимального значения. Отсюда следует практический вывод: использование сепаратора с заниженным шагом полюсов приведёт к большему ухудшению технологических показателей обогащения по сравнению с использованием сепаратора с завышенным шагом полюсов.

4. Степень уменьшения удельной магнитной силы относительно максимального значения снижается с увеличением расстояния  $\Delta$  и крупности частиц.

Следует отметить, что формулы (2.36) выведены при принятии ряда допущений, таких как постоянство магнитных свойств в объёме частицы, идеализация формы частицы, обогащение частиц одинакового размера при их монослойном движении через рабочую зону сепаратора и др. Поэтому «оптимальное» значение шага полюсов многополюсной системы следует рассматривать как теоретическое и использовать для предварительной оценки максимального значения магнитной силы и оптимизации массы магнитной системы.

При реальном обогащении магнитной сепарации подвергают смесь частиц различной формы и размеров. Кроме этого, промышленные сепараторы часто работают не в режиме монослойной подачи материала, поэтому расстояние  $\Delta$  изменяется. Поэтому производители выпускают сепараторы с ограниченным рядом значений шага полюсов, что оправданно как экономически, так и технологически, так как варианты изменения крупности обогащаемого материала сформированы многолетней практикой и не изменяются. При этом один шаг полюсов рекомендуется для широкого диапазона крупности и диапазоны крупности для разных шагов полюсов перекрывают друг друга.

Например, компания «Metso Minerals» выпускает барабанные сепараторы «Sala» с верхней подачей материала модели «BSA» (обогащение руды после первой и второй стадий дробления крупностью до 200 мм) и модели «DS» (обогащение мелкодроблёной руды крупностью менее 25 мм). Сепараторы в зави-

симости от крупности имеют шаг полюсов: «BSA» – 165; 250 мм; «DS» – 25; 45; 65; 100; 165 мм. Для сепараторов модели «DS», согласно официальному каталогу ([www.metso.ru](http://www.metso.ru)), рекомендован следующий шаг полюсов в зависимости от крупности обогащаемого материала:

| Шаг полюсов, мм | Крупность – размер отверстия сита, через которое прошло 90 % материала, $d_{90}$ , мм |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 25              | $0 \div 5$                                                                            |
| 45              | $0 \div 10$                                                                           |
| 65              | $3 \div 13$                                                                           |
| 100             | $7 \div 18$                                                                           |
| 165             | $15 \div 25$                                                                          |

Для барабанных сепараторов «Sala», работающих в центробежном режиме (повышенная частота оборотов барабана) и применяемых для получения готовых железных концентратов шаг полюсов зависит от крупности обогащаемого материала: шаг полюсов равен 25; 45; 65 мм при крупности менее 0,15; 1,0; 12,5 мм соответственно [32, 66].

Таким образом, шаг полюсов многополюсной магнитной системы барабанного сухого сепаратора с верхней подачей материала определяется предполагаемой крупностью обогащаемого материала. Это необходимо учитывать при выборе сепаратора.

### **Сухие сепараторы (подвесные железоотделители) с нижней подачей материала**

Формула (2.36) применима для нахождения шага полюсов магнитных систем сухих сепараторов с нижней подачей, например, подвесных железоотделителей. Величина  $\Delta$  будет равняться расстоянию от поверхности магнитной системы (от полюса) до частицы (до верхней её границы).

При этом расстояние  $\Delta$  будет значительно больше, чем у сепараторов с верхней подачей материала. Поэтому для извлечения магнитных частиц с большего расстояния необходимо увеличивать шаг полюсов (при неизменной индукции магнитного поля на поверхности полюсов). Это приводит к увеличению геометрических размеров полюсов и массы сепаратора. У подвесных железоотделителей, устанавливаемых над транспортерными лентами, для увеличения глубины магнитного поля используют электромагнитные системы с шагом полюсов до  $S=0,4-0,6$  м.

Использование редкоземельных магнитов (Nd-Fe-B) позволяет извлекать ферромагнитные частицы при шаге полюсов ниже расчётного по формуле (2.36). Это значительно снижает массу сепаратора (железоотделителя). При

этом необходимую магнитную силу для извлечения частиц создают не оптимизацией шага полюсов, а увеличением индукции магнитного поля на поверхности полюсов.

### **Мокрые барабанные сепараторы с нижней подачей материала**

Мокрые барабанные сепараторы типа ПБМ с нижней подачей материала со слабым магнитным полем применяются для обогащения измельчённых сильномагнитных (магнетитовых) руд. Крупность разделяемых частиц в зависимости от стадии измельчения изменяется от 0,045 до 3 мм. При расчёте по формуле (2.36) при глубине ванны сепаратора 50 мм получается шаг полюсов, равный 380-400 мм, что значительно выше используемого на практике. При этом удельная магнитная сила, рассчитанная по формуле (2.34), недостаточна для извлечения сростка магнетита с породным минералом с  $\chi=10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг со дна ванны. Тем не менее сепараторы типа ПБМ считаются одними из самых эффективных обогатительных аппаратов.

Стандартные сепараторы типа ПБМ с системой из феррит-бариевых постоянных магнитов имеют шаг полюсов порядка 130 мм, индукцию на поверхности барабана 0,16 Тл и индукцию на дне ванны (на расстоянии 50 мм от барабана), равную 0,05 Тл. Этих характеристик достаточно для извлечения не ниже 95 % магнетитового железа (в целом по фабрике), что не согласуется с теоретическими формулами для расчёта удельной магнитной силы и «оптимального» шага полюсов.

Все вышерассмотренные формулы справедливы для одной частицы идеализированной формы и могут применяться либо для крупных частиц, либо для слабомагнитных частиц. Магнетит относится к сильномагнитным минералам, поэтому его мелкие частицы (после измельчения) соединяются в пряди и *флокулы* – более крупные агрегаты, состоящие из нескольких частиц. Эффект «кажущегося укрупнения» частиц магнетита в магнитном поле (соединения во флокулы) не учтён в формулах (2.34) и (2.36), что приводит к завышению расчётной необходимой магнитной силы и шага полюсов.

Кроме этого, при мокром обогащении частицы магнетита поступают в ванну сепаратора как в непосредственной близости от барабана (от магнитной системы), так и на максимальном удалении (вблизи дна ванны). В рабочей зоне сепаратора типа ПБМ частицы магнетита, имеющие высокую магнитную проницаемость и движущиеся вблизи барабана, сразу притягиваются к нему и выступают в качестве проводника магнитного поля. Поэтому к ним начинают притягиваться частицы магнетита, первоначально движущиеся на большем рас-

стоянии от барабана, вплоть до магнетитсодержащих частиц, движущихся у дна ванны сепаратора. Этот эффект способствует эффективному извлечению сильномагнитных измельчённых частиц в сепараторах с нижней подачей материала и также не учтён в формулах (2.34) и (2.36), что приводит к завышению расчётной необходимой магнитной силы и шага полюсов.

Однако сепараторы типа ПБМ способны эффективно обогащать сильномагнитную измельчённую магнетитовую руду (промпродукт) при высоком содержании в ней магнетита (10 % и выше). При низком содержании в пульпе (в смеси воды и измельчённых частиц) сильномагнитных частиц формулы (2.34) и (2.36) будут актуальны, что потребует либо поднять индукцию магнитного поля на поверхности магнитной системы, либо увеличить шаг полюсов, либо применить другие решения (например, использовать магнитные флокуляторы).

Таким образом, оптимизация шага полюсов многополюсной магнитной системы позволяет создать требуемую магнитную силу при меньшей массе магнитной системы, а следовательно, при меньшей цене сепаратора. Расчётные формулы (2.36) справедливы для одной частицы идеализированной формы и могут применяться для предварительного выбора шага полюсов либо для крупных частиц, либо для слабомагнитных частиц, либо для мелких сильномагнитных частиц при их незначительном количестве (менее 10 %) в питании сепаратора. При обогащении в мокрых барабанных сепараторах с нижней подачей материала измельчённой магнетитсодержащей руды (промпродукта) при высоком содержании в ней магнетита (10 % и выше) шаг полюсов нельзя рассчитывать по формулам (2.36).

#### **2.4.4. Магнитное поле валковых сепараторов с замкнутой системой для слабомагнитных руд**

Сепараторы с замкнутыми магнитными системами применяют для обогащения слабомагнитных руд и продуктов. Наибольшее распространение получили валковые сепараторы с нижней подачей материала (рис. 2.4).

Замкнутая магнитная система состоит из электромагнита с полюсными наконечниками (2 или 4 шт.) и вращающегося железного вала. Части вала, находящиеся напротив полюсных наконечников, имеют в основном зубчатое сечение. Криволинейная поверхность полюсных наконечников, находящаяся напротив вала, имеет в основном желобчатое сечение. Заострение каждого зубца вала находится напротив дна желобка полюсного наконечника. Магнит-

ный поток замыкается между полюсами электромагнита через вращающийся индукционный валок (см. рис. 2.4).

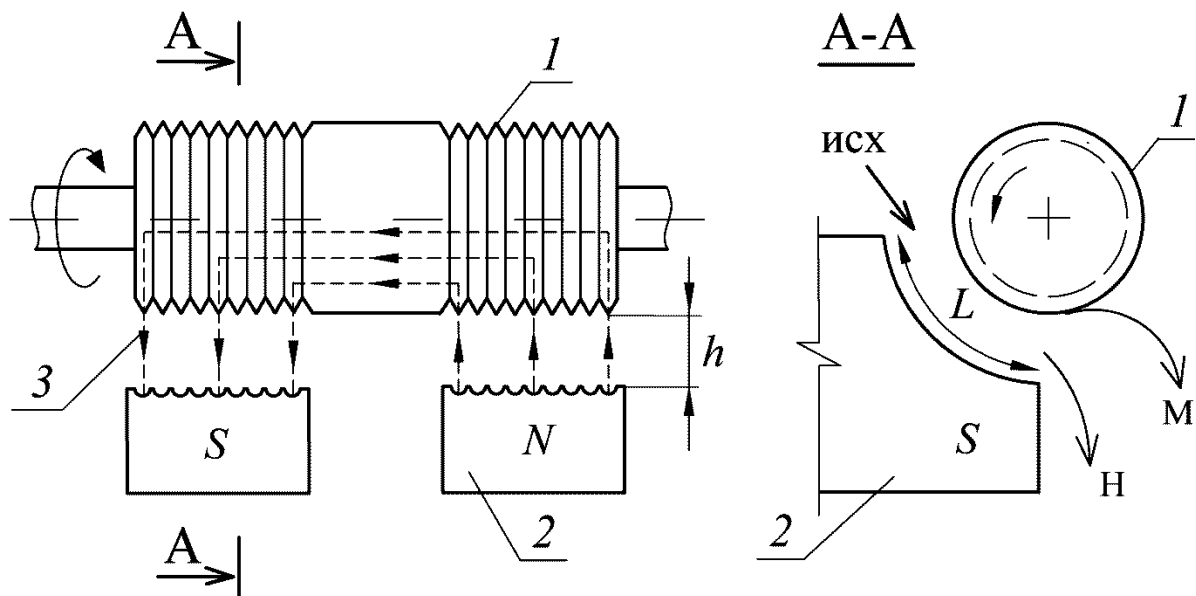


Рис. 2.4. Схема замкнутой магнитной системы валкового сепаратора:  
1 – валок с зубчатым сечением; 2 – полюсные наконечники с желобчатым сечением; 3 – схематичное изображение замыкания магнитного потока.  $L$  – длина рабочей зоны;  $h$  – высота рабочей зоны

Длина  $L$  рабочей зоны валкового сепаратора определяется расстоянием от начала участка, где начинается притяжение слабомагнитных частиц к валку, до участка, где происходит разгрузка немагнитных частиц и равна длине криволинейной поверхности полюсных наконечников. Рабочая зона сепараторов с замкнутой магнитной системой характеризуется высотой межполюсного зазора  $h$ , через который происходит замыкание магнитного потока. Высота  $h$  выбирается в основном исходя из крупности обогащаемого материала, его магнитных свойств и возможности создания в межполюсном зазоре магнитной силы, необходимой для извлечения слабомагнитных частиц.

Сепараторы для обогащения слабомагнитных руд с замкнутыми магнитными системами имеют рабочую зону малой длины и высоты, что объясняется трудностью создания сильного поля в большом объеме. В этих сепараторах частицы разделяемого материала движутся между полюсами (в межполюсном зазоре), что ограничивает крупность обогащаемых частиц (обычно менее 5 мм).

При использовании валка с зубчатым сечением с малым радиусом кривизны происходит резкое повышение индукции магнитного поля на зубцах и снижение индукции между зубцами. Индукция магнитного поля на полюсном наконечнике значительно ниже, чем на зубцах валка. Магнитное поле валковых

сепараторов отличается высокой неоднородностью, что проявляется в резком увеличении индукции магнитного поля от полюсного наконечника к зубцам вала.

При движении разделяемых частиц по желобкам полюсного наконечника слабомагнитные частицы извлекаются из потока материала и притягиваются к зубцам вала (перемещаются в участки магнитного поля с большей индукцией). Магнитное поле индуцируется на зубах вала только в рабочей зоне сепаратора напротив полюсных наконечников. Поэтому извлечённые слабомагнитные частицы удерживаются на валке только в рабочей зоне сепаратора. При повороте вала (при выходе части вала из рабочей зоны) он размагничивается, и слабомагнитные частицы под действием центробежной силы и силы тяжести отрываются от вала. Немагнитные частицы к валку не притягиваются и движутся по криволинейной поверхности полюсного наконечника, разгружаясь в месте окончания полюсного наконечника (см. рис. 2.4).

Наиболее часто в сепараторах применяют сочетания многозубчатого полюса с зубцами треугольного или прямоугольного сечений (вращающийся валок, ролик) и противопоставленного ему неподвижного плоского полюса или полюса с желобками-выемками (полюсный наконечник электромагнита) (рис. 2.5).

Треугольное сечение зубцов вала сепаратора позволяет получить более высокое значение магнитной силы ( $B_{grad}B$ ) 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 желобками-выемками напротив многозубчатого полюса приводит к повышению неоднородности магнитного поля и величины  $B_{grad}B$  по сравнению с плоским неподвижным полюсом.

При треугольном сечении зубцов на величину  $B_{grad}B$  оказывают влияние угол заострения зубцов  $2\alpha$  и радиус закругления края зубцов. Угол заострения зубцов обычно принимают равным  $45-50^\circ$ , а радиус закругления края зубцов –  $0,1S$  (см. рис. 2.5).

Шаг зубцов  $S$  и расстояние  $h$  между полюсами оказывают существенное влияние на магнитную силу. *Под шагом зубцов  $S$  понимают расстояние между одноимёнными боковыми сторонами двух соседних зубцов* (см. рис. 2.4).

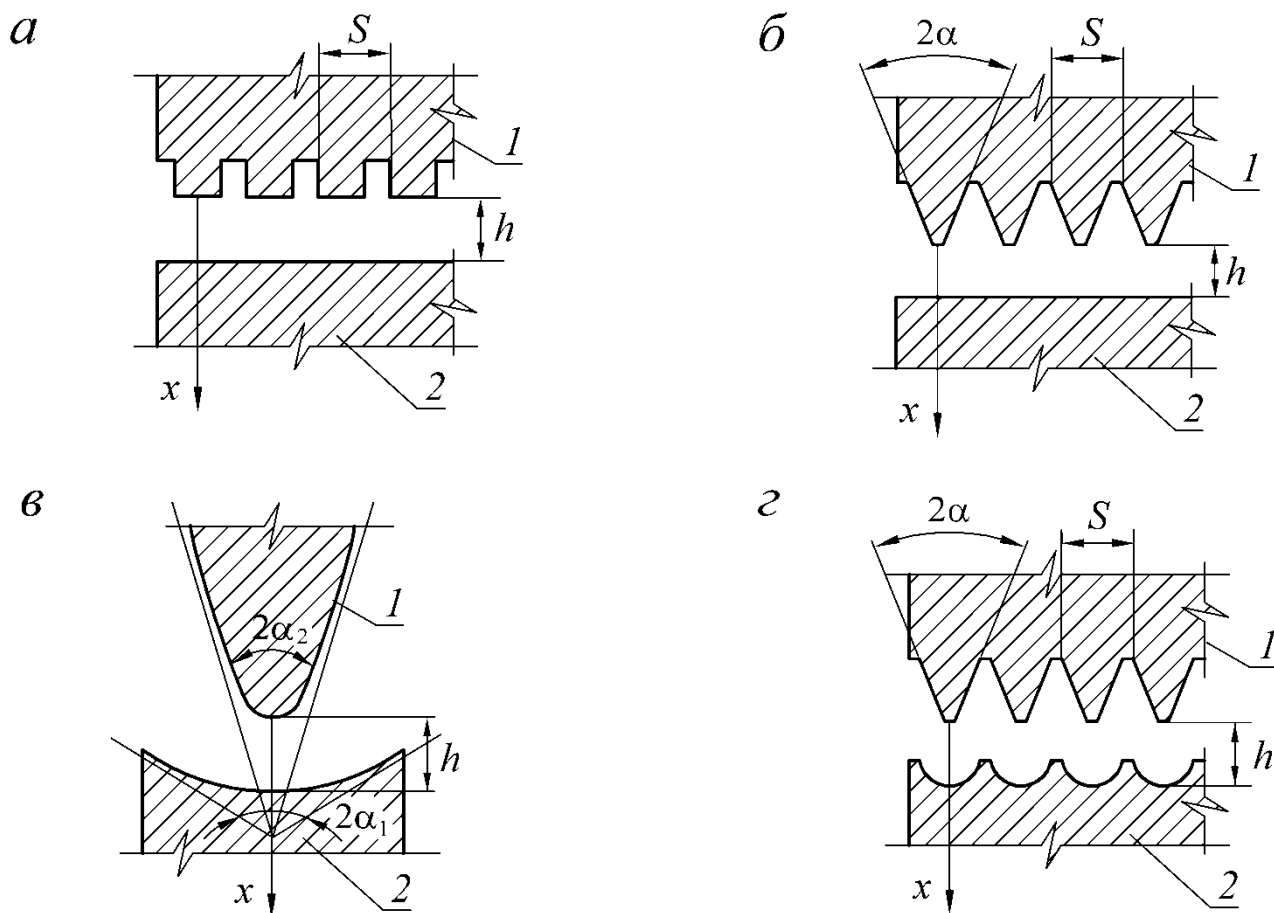


Рис. 2.5. Форма полюсов, применяемых в замкнутых магнитных системах сепараторов для слабомагнитных руд:

*а* – 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.

1 – индукционный полюс (валок); 2 – неподвижный полюс магнитной системы.

$S$  – шаг зубцов;  $h$  – расстояние между полюсами;  $2\alpha$  – угол заострения зубца;  $2\alpha_1$  и  $2\alpha_2$  – углы между асимптотами вогнутого и выпуклого гиперболических полюсов

При сочетании многозубчатого полюса (вращающегося валка) и неподвижного плоского полюса придерживаются соотношения:  $h \leq 0,5S$ . Если неподвижный полюс имеет желобчатое сечение, то придерживаются соотношения:  $h \leq S$ .

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

*Сочетание плоского полюса и многозубчатого полюса (см. рис. 2.5, а, б)*

При  $h \leq 0,5S$  для расчета напряжённости магнитного поля и удельной магнитной силы в рабочей зоне валкового сепаратора можно использовать следующие формулы [13]:

$$H_x = \frac{0,5SH_0(1-c)^{0,5}}{\left[0,25S^2 - c(0,5S - x)^2\right]^{0,5}} ; \quad (2.37)$$

$$H_{\text{grad}H} = \frac{0,25S^2 H_0^2 c(0,5S - x)(1-c)}{\left[0,25S^2 - c(0,5S - x)^2\right]^2} , \quad (2.38)$$

где  $H_x$  и  $H_0$  – напряженность магнитного поля на расстоянии  $x$  от зубца и на зубце ( $x=0$ ), А/м;  $S$  – шаг зубцов валка, м;  $c$  – параметр, зависящий от формы зубцов и их шага.

Параметр  $c$  для электромагнитной системы 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).

При  $h > 0,5S$  для расчета напряжённости магнитного поля и удельной магнитной силы в рабочей зоне валкового сепаратора можно использовать следующие формулы [9]:

$$H_x = H_h \left[ 1 - c \left( \frac{0,5S - x}{0,5S} \right)^n \right]^{-0,5} ; \quad (2.39)$$

$$H_{\text{grad}H_x} = H_h^2 n c y^{n-1} / \left[ S(1 - cy^n)^2 \right] , \quad (2.40)$$

где  $H_x$  – напряженность поля на расстоянии  $x$  от зубца, А/м;  $H_h$  – напряженность у плоского полюса ( $x=h$ ), А/м;  $S$  – шаг зубцов валка, 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);  $y = (S-x)/S$ .

Формулами (2.37) – (2.40) можно пользоваться для расчета приближенной характеристики магнитного поля при условиях:  $2\alpha = 45-50^\circ$ ; радиус закругления края зубцов –  $0,1S$ .

На рис. 2.6 приведена зависимость изменения напряжённости магнитного поля при удалении от зубцов валка для магнитной системы, состоящей из многозубчатого валка с  $S=10$  мм и плоской магнитной системой из постоянных редкоземельных магнитов (Nd-Fe-B, чередование полюсов вдоль длины индук-

ционного вала). Приведённая зависимость показывает, что при увеличении межполюсного зазора  $h$  напряжённость магнитного поля на зубцах вала снижается.

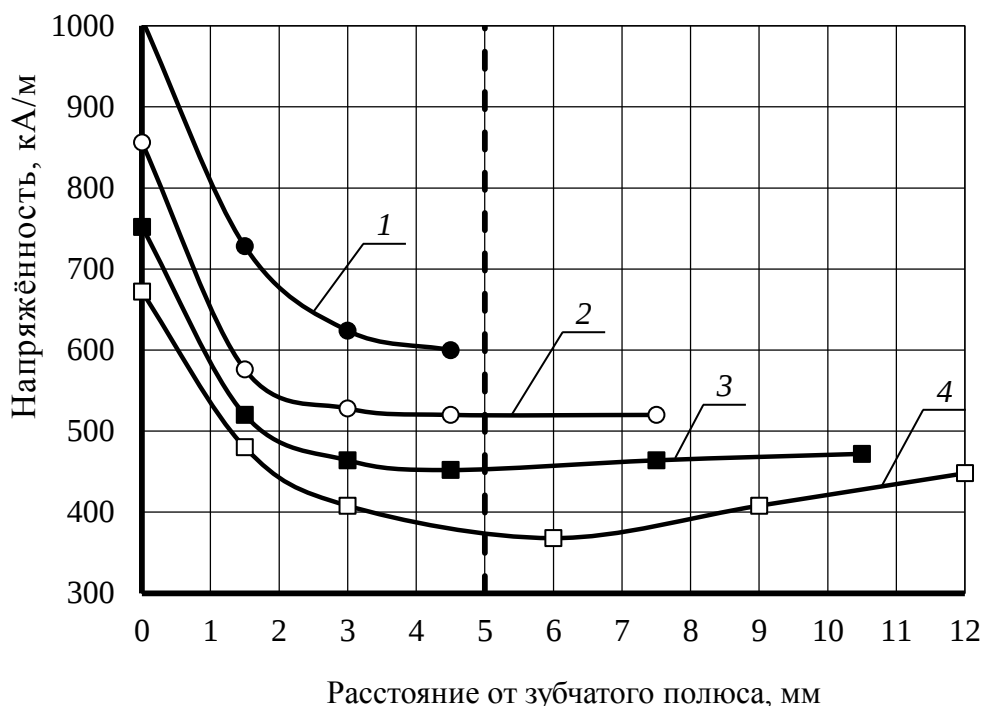


Рис. 2.6. Зависимость напряжённости магнитного поля от расстояния до зубца вала:  
 1 –  $h=4,5$  мм; 2 –  $h=7,5$  мм; 3 –  $h=10,5$  мм; 4 –  $h=12$  мм

При  $h \leq 0,5S$  напряжённость магнитного поля будет возрастать от полюсного наконечника к зубцам вала, магнитное поле будет неоднородно и будет достигнуто высокое значение  $B_{gradB}$ , позволяющее эффективно извлекать слабомагнитные частицы. При  $h > 0,5S$  магнитное поле станет однородным на участке, прилегающем к плоскому полюсу, начнётся незначительное увеличение индукции магнитного поля в сторону плоского полюса и будет затруднено извлечение слабомагнитных частиц. При  $h > S$  индукция магнитного поля на поверхности плоского полюса, хотя и будет меньше, чем на зубцах вала, но превысит индукцию магнитного поля в центре межполюсного зазора. В дальнейшем, по мере увеличения межполюсного зазора  $h$ , индукция магнитного поля будет снижаться от полюсного наконечника к зубцам вала, что приведёт к невозможности извлечения слабомагнитных частиц. Поэтому в валковых сепараторах с нижней подачей материала расстояние между полюсами (высота рабочей зоны разделения) должно быть меньше половины шага зубцов индукционного вала ( $h \leq 0,5S$ ).

Это ограничивает крупность разделяемых частиц. При увеличении крупности частиц необходимо одновременно увеличивать шаг зубцов и межполюсный зазор.

Зависимости, приведённые на рис. 2.6, описываются уравнениями (2.37) и (2.39). Для участка  $h \leq 0,5S$  параметр  $c$  изменяется от 0,65 до 0,7. Для участка  $h > 0,5S$  параметр  $c$  изменяется от 0,07 до 0,03 при увеличении  $h$  от 7,5 до 12 мм ( $n=2$  – треугольное сечение зубцов). Для описания таких зависимостей на участке  $h \leq 0,5S$  применима формула (2.30). Величина  $c$  равна коэффициенту неоднородности магнитного поля и рассчитывается по формуле (2.28):  $c=0,324$ . При этом вместо шага полюсов многополюсной системы используется шаг зубцов вала. Параметр  $k$  изменяется от 0,32 до 0,35 при увеличении  $h$  от 4,5 до 12 мм.

*Сочетание многозубчатого полюса с зубцами треугольного сечения и желобчатого полюса* (см. рис. 2.5, в, г)

Частным случаем сочетания многозубчатого полюса с зубцами треугольного сечения и полюса с выемками (см. рис. 2.5, г) является сочетание одного зубчатого и одного вогнутого полюсов гиперболической формы (см. рис. 2.5, в).

Для описания изменения напряжённости магнитного поля между двумя гиперболическими полюсами была выведена формула [13]:

$$H_x = \frac{H_0 h \sin \alpha_2}{\left[ h^2 - (h \cos \alpha_2 - kx)^2 \right]^{0,5}}, \quad (2.41)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – половины углов между асимптотами вогнутого и выпуклого гиперболических полюсов;  $k$  – коэффициент, равный  $\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1$ .

Напряжённость поля вблизи вогнутого гиперболического полюса

$$H_h = H_0 \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1}. \quad (2.42)$$

Удельная магнитная сила  $H \text{grad} H$

$$H \text{grad} H = \frac{k H_0^2 h^2 \sin^2 \alpha_2 (h \cos \alpha_2 - kx)}{\left[ h^2 - (h \cos \alpha_2 - kx)^2 \right]^2}. \quad (2.43)$$

Формулы (2.41) – (2.43) можно использовать только для приблизительно-го расчёта напряжённости и в рабочем зазоре сепаратора с сочетанием многозубчатого полюса с зубцами треугольного сечения (вала) и полюса с выемками, так как наличие соседних зубцов ослабляет удельную силу  $H \text{grad} H$ . Как по-

казали теоретические и экспериментальные исследования, для более точных расчётов необходимо в формулу (2.43) ввести поправочный коэффициент, равный 0,7-0,8 [13].

Экспериментальные исследования по измерению напряжённости магнитного поля между заострением зубца вала и основанием впадины желобка при шаге зубцов  $S \leq 50$  мм показали, что напряжённость практически прямолинейно снижается с увеличением расстояния от зубца. Поэтому можно приближенно воспользоваться следующими формулами [9]:

$$H_x = H_h[1 + m(h-x)]; \quad (2.44)$$

$$H_{\text{grad}H} = mH_h^2[1 + m(h-x)], \quad (2.45)$$

где  $m$  - параметр, равный  $(H_0 - H_h)/(H_h h)$ ,  $\text{см}^{-1}$ .

Следует отметить, что формулы (2.41) – (2.45) следует использовать только для приблизительных расчётов, так как в них не входит в качестве фактора шаг зубцов вала. Рассмотренные формулы дают приблизительное значение напряжённости магнитного поля при  $h \leq S$ .

Для описания таких зависимостей также применима формула (2.30). Величины коэффициентов  $c$  и  $k$  определяются методом наименьших квадратов по данным экспериментальных определений напряжённости (индукции) магнитного поля в рабочем зазоре сепаратора.

В настоящее время в промышленных валковых сепараторах в основном используется сочетание многозубчатого полюса с зубцами треугольного сечения и желобчатого полюса (см. рис. 2.5, *г*), предложенное В. И. Кармазиным и В. Г. Деркачом [9]. Такое сочетание позволило увеличить удельную магнитную силу  $H_{\text{grad}H}$  в рабочем зазоре валковых сепараторов и увеличить верхний предел крупности слабомагнитной руды, обогащаемой на этих сепараторах.

#### 2.4.5. Магнитное поле высокоградиентных сепараторов

Суть процесса высокоградиентной магнитной сепарации (ВГМС) состоит в прохождении пульпы через слой ферромагнитных намагниченных тел, которые создают магнитную силу за счёт резкого повышения градиента индукции, достаточную для извлечения весьма слабомагнитных частиц (см. рис. 1.1, *в*) Этот процесс ещё называют полиградиентной магнитной сепарацией, так как ферромагнитная среда может создавать неоднородное магнитное поля в разных направлениях и во всём объёме межполюсного зазора. Высокоградиентную се-

парацию применяют только для мелких слабомагнитных частиц (менее 3 мм), что связано с необходимостью создания сильного магнитного поля.

Название «полиградиентная сепарация» принято в 60-е годы XX века в СССР. За рубежом несколько позже возникло название «высокоградиентная магнитная сепарация» (ВГМС – HGMS), которое более широко используется в настоящее время [21].

Разделение в высокоградиентных сепараторах происходит в межполюсном зазоре замкнутой магнитной системы, заполненной ферромагнитной средой. Магнитный поток проходит через ферромагнитную среду, которая намагничивается и создаёт в своём объёме более сильное магнитное поле, по сравнению с воздушным (водным) объёмом. Процесс ВГМС осуществляется в водной среде. Исходная пульпа подаётся в объём ферромагнитных намагниченных тел, к которым притягиваются слабомагнитные частицы. Немагнитные частицы вместе с водой проходят через объём ферромагнитных тел и разгружаются в нижней части. В дальнейшем рабочая ячейка сепаратора с ферромагнитными телами и с притянувшимися к ним слабомагнитными частицами выходит из межполюсного зазора. Ферромагнитные тела размагничиваются и больше не удерживают на своей поверхности слабомагнитные частицы, которые смываются водой (см. рис. 1.1, в).

В качестве ферромагнитной среды используются шарики, рифлёные пластины, стержни, сетки. Феррозаполнители матриц сепараторов изготавливаются из магнитномягких сталей с высокой магнитной проницаемостью, низкой остаточной индукцией и высокой абразивной и коррозионной стойкостью. Высокая магнитная проницаемость необходима для повышения магнитной проводимости в межполюсном зазоре. Низкая остаточная индукция необходима для полного размагничивания ферромагнитной среды после входа из межполюсного зазора для обеспечения смыва слабомагнитных частиц с поверхности ферромагнитных тел.

При введении в межполюсный зазор ферромагнитных тел магнитная проводимость в зазоре увеличится по сравнению с проводимостью в воздухе пропорционально магнитной проницаемости среды, что приведёт к увеличению индукции магнитного поля в межполюсном зазоре.

Магнитную проводимость в воздушном зазоре между полюсами прямоугольной формы при малой величине зазора  $h$  приближённо можно рассчитать по формуле:

$$\Lambda_{\text{в}} = \mu_0 \frac{S_h}{h} \quad (2.46)$$

где  $\Lambda_b$  – магнитная проводимость в воздушном (вакуумном, водном) зазоре, Гн;  $S_h$  – площадь сечения межполюсного зазора, м<sup>2</sup>;  $h$  – величина межполюсного зазора, м.

Магнитную проводимость в зазоре, заполненном ферромагнитными телами между полюсами прямоугольной формы при малой величине зазора  $h$ , приближённо можно рассчитать по формуле:

$$\Lambda_\phi = \mu_\phi \mu_0 \frac{S_h}{h}, \quad (2.47)$$

где  $\Lambda_\phi$  – магнитная проводимость в зазоре, заполненном ферромагнитными телами, Гн;  $\mu_\phi$  – магнитная проницаемость (относительная) ферромагнитной среды.

Из формул (2.46) и (2.47) следует, что магнитная проводимость, во многом определяющая индукцию магнитного поля в межполюсном зазоре, зависит от магнитной проницаемости (относительной) ферромагнитной среды.

Магнитную проницаемость ферромагнитной среды в межполюсном зазоре высокоградиентного сепаратора можно рассчитать по формуле:

$$\mu_\phi = B_\phi / B_b, \quad (2.48)$$

где  $B_\phi$  и  $B_b$  – индукция магнитного поля на поверхности полюсов магнитной системы при межполюсном зазоре, заполненном и не заполненном ферромагнитными телами соответственно, Тл.

Следует отметить, что для оценки силовой характеристики магнитного поля высокоградиентных сепараторов следует использовать только индукцию магнитного поля, так как разделение осуществляется в среде, заполненной ферромагнитными телами. Использование для этой цели напряжённости магнитного поля будет некорректно.

Для расчёта магнитной силы ( $B \text{grad} B$ ), действующей на разделяемые частицы в рабочей зоне высокоградиентного сепаратора, необходимо иметь зависимость изменения индукции магнитного поля в зазоре между ферромагнитными телами. Однако прямое измерение индукции магнитного поля затруднено, так как зазор между ферромагнитными телами незначительный, что связано с созданием высокого магнитного поля для обогащения слабомагнитных мелких частиц.

Теоретические расчёты изменения индукции магнитного поля в зазоре между ферромагнитными телами, пригодные для практического применения,

весьма затруднительны и в настоящее время не разработаны. В работах [21, 25] приведены некоторые теоретические подходы для оценки магнитного поля, создаваемого двумя ферромагнитными шарами. Приведённые формулы достаточно сложно использовать для практических расчётов, так как они идеализированы (только два шара) и не учитывают множество факторов. Наиболее простая в применении экспоненциальная зависимость для расчёта  $B_{\text{grad}B}$  (формула (4.71) работы [21]), вида формулы (2.30) настоящей работы, включает два безразмерных коэффициента, учитывающих влияние соседних шаров. Определение этих безразмерных коэффициентов требует специальных экспериментов.

Для предварительного сравнения магнитной силы, создаваемой различными ферромагнитными средами можно использовать формулу (2.48), учитывая, что величины  $B_{\text{ф}}$  и  $B_{\text{в}}$  можно измерить тесламетром. Чем выше будет величина  $\mu_{\text{ф}}$ , тем больше будет магнитная сила, создаваемая ферромагнитной средой в межполюсном зазоре высокоградиентного сепаратора.

### **Пример**

Выполнены измерения индукции на полюсе замкнутой магнитной системы лабораторного высокоградиентного сепаратора с электромагнитной системой (рис. 1.1, в). Измерения выполнены при отсутствии ферромагнитных тел в рабочей матрице (воздух, низкая магнитная проводимость) и при заполненной ферромагнитными телами матрице (ферромагнитная среда с высокой магнитной проводимостью). В качестве ферромагнитной среды использованы шарики (диаметр 4-6 мм) и рифлёные зубчатые пластины (шаг зубцов 3,5 мм, расстояние между пластинами 2,5 мм). Результаты измерений приведены на рис. 2.7.

Рассчитать магнитную проницаемость (относительную) двух ферромагнитных сред и выполнить сравнение шариков и рифлёных пластин, установленных с зазором 2,5 мм.

### **Решение**

Расчёт магнитной проницаемости для сравниваемых ферромагнитных сред при разной силе тока выполняем по формуле (2.48).

Например, при силе тока 5 А индукция магнитного поля на полюсе электромагнитной системы при межполюсном зазоре, заполненном воздухом, рифлёными пластинами и шариками равна:  $B_{\text{в}}=0,71$ ;  $B_{\text{ф1}}=1,19$ ;  $B_{\text{ф2}}=1,39$  Тл. Тогда  $\mu_{\text{ф1}}=1,19/0,71=1,68$ ;  $\mu_{\text{ф2}}=1,39/0,71=1,96$ . Результаты расчётов приведены на рис. 2.8.

По результатам расчётов можно отметить следующее.

При увеличении силы тока индукция магнитного поля на полюсе электромагнитной системы для всех сред возрастает. Индукция магнитного поля на полюсе электромагнитной системы выше для ферромагнитных сред, чем для воздуха. Максимальное значение индукции достигается при использовании шариков (см. рис. 2.7).

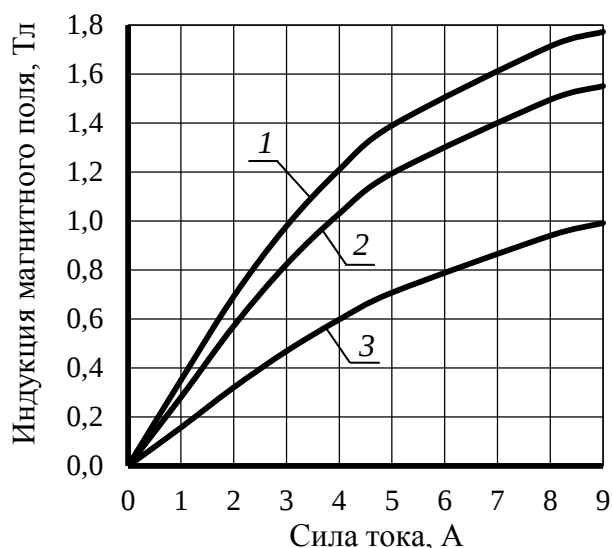


Рис. 2.7. Зависимость индукции магнитного поля на полюсах сепаратора от силы тока и вида среды в межполюсном зазоре: 1 – шарики; 2 – рифлёные пластины; 3 – воздух

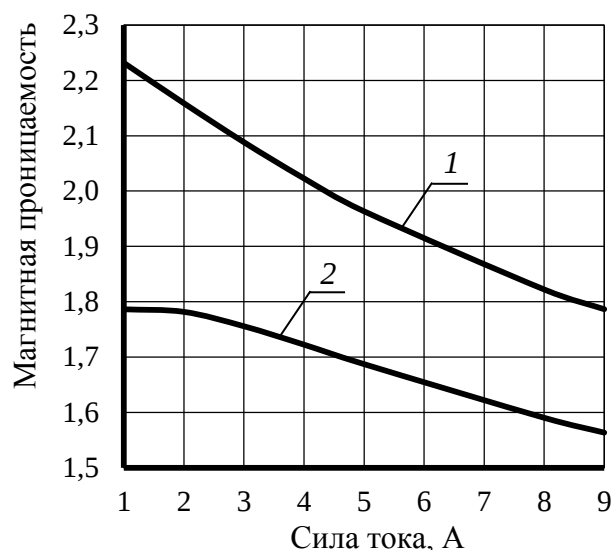


Рис. 2.8. Зависимость магнитной проницаемости среды от силы тока, питающего электромагнит, и вида среды в межполюсном зазоре: 1 – шарики; 2 – рифлёные пластины

При увеличении силы тока магнитная проницаемость ферромагнитных сред снижается, но остаётся больше единицы (магнитная проницаемость воздуха  $\mu_b \approx 1$ ). Магнитная проницаемость шариков выше, чем у рифлёных пластин (см. рис. 2.8). Это говорит о том, что применение в высокоградиентном сепараторе рассматриваемой конструкции шариков диаметром 4-6 мм позволит обеспечить более высокую магнитную силу и извлечение слабомагнитных частиц, по сравнению с использованием рифлёных пластин. Однако применение шариков приводит к значительному снижению производительности сепаратора и к уменьшению крупности исходного продукта.

#### 2.4.6. Экспериментальное определение индукции (напряжённости) магнитного поля сепаратора

Для инженерных расчётов и для приёмки и настройки сепараторов необходимо знать индукцию магнитного поля в определённых точках пространства. Теоретические расчёты выполняются по специальным компьютерным программам. Экспериментальные определения, например, для получения зависимостей, приведённых на рис. 2.2, выполняют с помощью измерительных приборов.

В настоящее время индукцию магнитного поля сепаратора определяют с помощью переносного измерительного прибора, называемого тесламетр.

Наибольшее распространение для измерения индукции поля магнитных сепараторов получил прибор, в основе измерений которого лежит эффект Хол-

ла. Если пластинку полупроводника поместить в магнитное поле перпендикулярно его силовым линиям и приложить в направлении длины пластинки некоторую разность потенциалов (4,5-9 В), создающую электрическое поле с напряжённостью  $E$ , то вследствие смещения носителей тока к другим граням полупроводника возникнет поперечная электродвижущая сила и разность потенциалов, которую можно измерить и которая будет пропорциональна индукции (напряжённости) магнитного поля.

Общий вид тесламетра приведён на рис. 2.9. Он состоит из измерительного плоского зонда-щупа или накладного зонда, гибкого провода и коробки с электронной измерительной частью и с индикацией индукции магнитного поля (цифровой или стрелочной). Прибор имеет две или три шкалы для измерения разных значений индукции, например: первая – 0-0,2 Тл; вторая – 0,5-1 Тл; третья – 0,5-2 Тл.

Для калибровки тесламетра можно использовать специальное устройство из постоянных магнитов – «мера магнитной индукции ММИ-1» (рис. 2.7). Мера магнитной индукции (ММИ) предназначена для воспроизведения и передачи единицы магнитной индукции Тесла, при проведении поверки или калибровки рабочих средств измерения магнитных полей. Мера обеспечивает строго установленное магнитное поле порядка 200 мТл в измеряемом объеме, в который помещается датчик тесламетра.

Для составления полной картины поля магнитного сепаратора измерения выполняют в нормальном направлении к поверхности полюса системы и в двух направлениях вдоль чередования одноимённых и разноимённых полюсов открытой многополюсной системы или в двух направлениях вдоль полюса замкнутой магнитной системы. Для открытых многополюсных систем измерения поля в трёх направлениях также выполняют между полюсами.

На практике в основном при приёмке и настройке сепаратора измерения индукции выполняют в нормальном направлении к поверхности полюса, так как эта величина определяет магнитную силу притяжения. Заводы-изготовители указывают эту величину (максимальную).

Для барабанного сепаратора с верхней подачей материала измерения выполняются в нормальном направлении к поверхности барабана над центром полюсов (максимальное значение индукции), а также на расстоянии от поверхности барабана, равном максимальному размеру куска или высоте слоя материала.

*a**б*

Рис. 2.9. Тесламетр (а) и мера магнитной индукции (б)

Для барабанного магнитного сепаратора с нижней подачей материала или для подвесного железоотделителя измерения выполняются в нормальном направлении к поверхности барабана сепаратора (ленты железоотделителя) над центром полюсов (максимальное значение индукции), а также на расстоянии, равном глубине ванны (барабанный сепаратор) или на поверхности ленты конвейера (подвесной железоотделитель).

Для валковых сепараторов с замкнутой магнитной системой измерения выполняют на заострении зубца вала и на противоположном полюсе при различном межполюсном зазоре.

Для всех сепараторов с электромагнитными системами выполняются дополнительные измерения при разном значении силы тока и строятся зависимости индукции магнитного поля от силы тока, подаваемого в обмотки электромагнита. С целью получения зависимостей, приведённых на рис. 2.6, для расчёта магнитной силы выполняются дополнительные измерения в нескольких точках.

Для перехода от индукции к напряжённости магнитного поля используется зависимость (2.6).

#### **2.4.7. Влияние крупности частиц на магнитную силу и на результаты магнитной сепарации**

Согласно формулам (2.33), (2.34), крупность (высота) частиц будет влиять на величину удельной магнитной силы. Поэтому при магнитном обогащении кроме разделения по магнитным свойствам происходит и разделение по крупности. Влияние крупности частиц на магнитную силу будет зависеть от способа подачи материала в рабочую зону сепаратора – верхняя или нижняя подача.

Магнитные системы сепараторов создают неоднородное магнитное поле. Величина  $H_{\text{grad}}H$  возрастает по направлению к полюсам, зубцам валков или к ферромагнитным телам. При этом в зависимости от способа подачи материала в сепаратор крупные и мелкие частицы могут оказываться в более сильных или слабых участках магнитного поля, и при одинаковых магнитных свойствах их извлечение в магнитный продукт может быть различным.

#### **Влияние крупности частиц на результаты разделения в сепараторах с верхней подачей материала**

При верхней подаче материала более мелкие частицы будут двигаться через более сильные участки магнитного поля, по сравнению с крупными частицами. Расстояние  $\Delta$  от поверхности магнитной системы (от полюса) до ближнего края частицы будет одинаковым как для крупной, так и для мелкой частицы. Однако расстояние  $\Delta+d$  (расстояние от магнитной системы до дальнего края частицы) будет меньшим для мелкой частицы (см. рис. 2.1, *a*), то есть мелкая частица будет двигаться на меньшем расстоянии от магнитной системы, и на неё будет действовать большая удельная магнитная сила, чем магнитная сила, действующая на более крупную частицу.

На рис. 2.10, *a* приведены зависимости удельной магнитной силы, действующей на частицы различной крупности с удельной магнитной восприимчивостью  $0,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$  в сепараторах с верхней подачей при индукции магнитного поля на поверхностях барабанов (полюсов) 0,16 (0,21) Тл и 0,25 (0,32) Тл. Удельная магнитная сила рассчитана по формуле (2.34).

Приведённые зависимости показывают снижение магнитной силы при увеличении крупности частицы. При реальном обогащении эта закономерность проявится в различной крупности магнитного и немагнитного продуктов –

магнитный продукт будет более мелкий по сравнению с немагнитным продуктом. Если быть точнее, то в сепараторах с верхней подачей материала происходит частичное разделение не по крупности, а по высоте частицы, что особенно проявляется при обогащении среднедроблёной и мелкодроблёной руды. Но принято использовать термин «крупность».

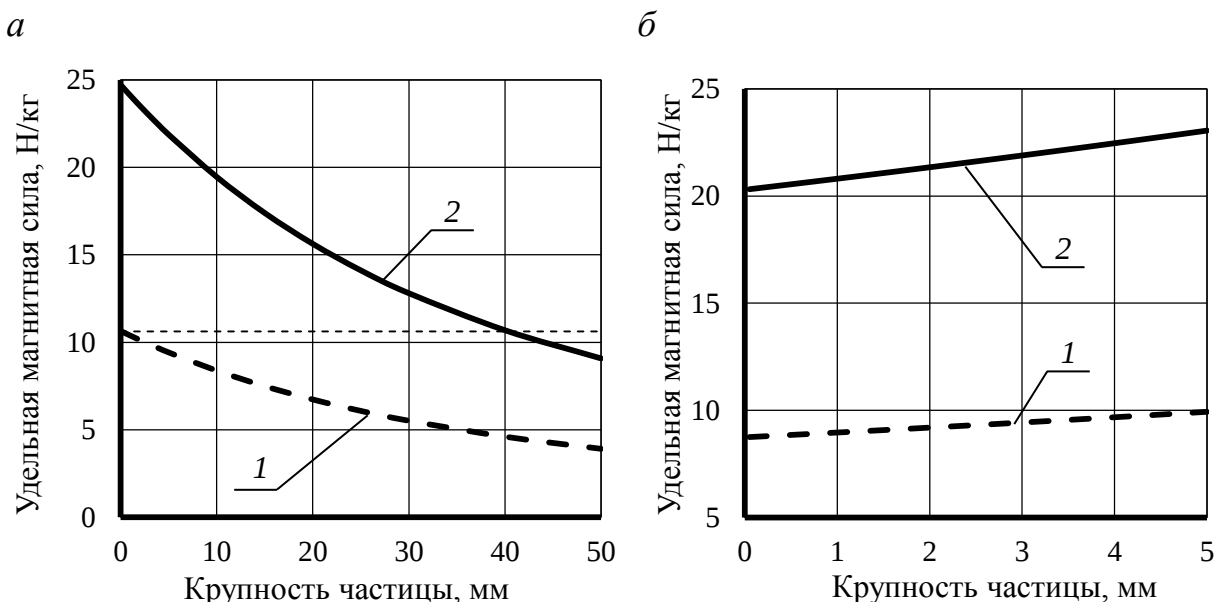


Рис. 2.10. Зависимость удельной магнитной силы, действующей на частицу, от крупности частицы:

*а* – барабанный сепаратор с верхней подачей; *б* – барабанный сепаратор с нижней подачей; 1 – индукция 0,16 Тл; 2 – индукция 0,25 Тл

На рис. 2.11 приведены характеристики крупности и лещадности кусков магнитного и немагнитного продуктов, полученные при обогащении магнетит-содержащей руды крупностью 20-70 мм в промышленном барабанном сепараторе ЭБС-80/170 (сепаратор переделан в шкивной сепаратор с верхней подачей материала). Лещадность частиц рассчитана как отношение большего размера частицы к меньшему размеру.

При магнитном обогащении в сепараторе с верхней подачей материала доля мелких и лещадных частиц в магнитном продукте выше, чем в немагнитном продукте (см. рис. 2.11). Частичное разделение по крупности при сухой магнитной сепарации объясняется тем, что, согласно формулам (2.33), (2.34), при увеличении крупности (высоты) частицы при прочих равных условиях магнитная сила притяжения снижается и частица отрывается от барабана при меньшем угле его поворота. Это повышает вероятность попадания более крупных частиц в немагнитный продукт. Частицы, характеризующиеся повышенной

лещадностью зёрен, имеют меньшую высоту по сравнению с низколещадными частицами. Поэтому вероятность попадания лещадных частиц в магнитный продукт выше, чем у частиц с низкой лещадностью. Поэтому форма дроблёной руды влияет на показатели обогащения в сепараторах с верхней подачей материала. Более высокое извлечение магнетитсодержащих частиц в магнитный продукт достигается при обогащении лещадных зёрен, нежели кубовидных зёрен. Поэтому использование в стадии рудоподготовки железных руд дробилок, разгрузка которых представлена в основном кубовидными частицами, приводит к повышению потерь магнетитового железа с немагнитным продуктом.

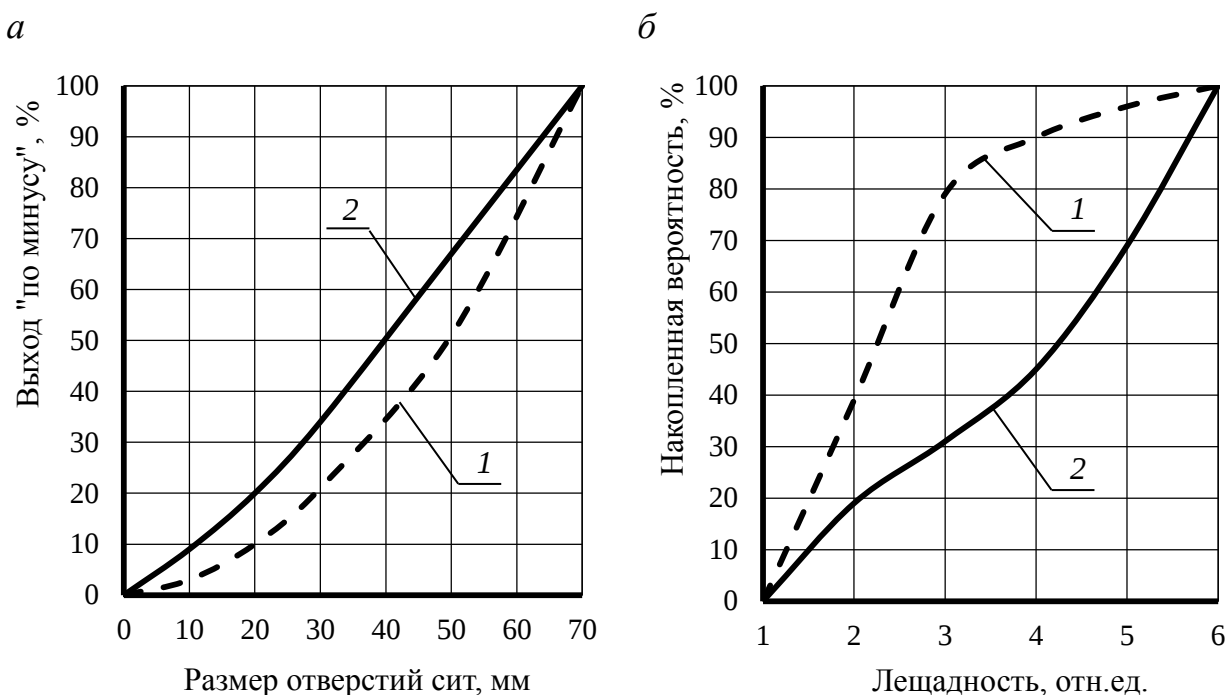


Рис. 2.11. Характеристики крупности и лещадности кусков магнитного и немагнитного продуктов при обогащении в барабанном сепараторе с верхней подачей материала:

*а* – ситовые характеристики; *б* – интегральное распределение кусков по лещадности:  
 1 – немагнитный продукт; 2 – магнитный продукт

Немагнитный продукт сухой магнитной сепарации магнетитовых руд используется для производства щебня. Поэтому более низкая лещадность зёрен немагнитного продукта способствует повышению качества щебня.

Перераспределение частиц магнитного и немагнитного продуктов по крупности при сухом обогащении в сепараторах с верхней подачей материала приводит к потерям магнитных минералов с крупными частицами, попадающими в немагнитный продукт. Поэтому дроблёную руду перед сухой магнитной сепарацией предварительно классифицировали по крупности (обычно на

два продукта) и обогащали отдельно полученные продукты различной крупности. Необходимость в предварительной классификации по крупности определяется величиной диапазона руды по крупности.

В. И. Кармазин [22] и А. П. Квасков [27] ввели понятие коэффициента удельной (отнесённой к единице массы) равнопритягиваемости частиц при магнитном обогащении. Условие равнопритягиваемости частиц:

$$\chi_D (H \text{grad} H)_D = \chi_d (H \text{grad} H)_d, \quad (2.49)$$

где  $\chi_D$  и  $\chi_d$  – удельные магнитные восприимчивости крупной и мелкой частицы, м<sup>3</sup>/кг;  $(H \text{grad} H)_D$  и  $\chi_d (H \text{grad} H)_d$  – удельные магнитные силы, действующие на крупную и мелкую частицы размером  $D$  и  $d$ , А<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

Соотношение размеров магнитных частиц ( $D/d$ ), притягиваемых с одинаковой силой к магнитной системе сепаратора, зависит от многих факторов, таких как диапазон изменения магнитной восприимчивости извлекаемых частиц, неоднородность магнитного поля (коэффициент  $c$ ), способ подачи материала в рабочую зону сепаратора (верхний или нижний), вид среды разделения (воздух, вода) и др. Поэтому это соотношение различно при обогащении на разных магнитных сепараторах различных типов руд.

А. П. Квасков [27] рассмотрел частный случай сухой сепарации дроблёной магнетитовой руды на барабанном сепараторе с верхней монослойной подачей материала и получил следующее соотношение для расчёта предельно допустимой разницы между максимальной и минимальной крупностью кусков обогащаемой руды:

$$\Delta d \leq D - d \leq \frac{\lg K^I}{c \cdot \lg e} \leq \frac{2,3 \cdot S \cdot \lg K^I}{\pi} \leq 0,73 \cdot S \cdot \lg K^I, \quad (2.50)$$

где  $K^I$  – отношения предельных значений удельных магнитных восприимчивостей, извлекаемых в магнитный продукт кусков руды,  $K^I = \chi_D / \chi_d$ , отн. ед.;  $c$  – коэффициент неоднородности магнитного поля, м<sup>-1</sup>;  $S$  – шаг полюсов многополюсной магнитной системы, м.

Если соотношение (2.50) не выполняется, то перед сухой магнитной сепарацией дроблёной руды необходимо использовать предварительное грохочение с отдельным обогащением мелкого и крупного продуктов. Из формулы (2.50) следует, что допустимая разница между максимальной и минимальной крупностью кусков обогащаемой руды возрастает при увеличении шага полюсов, что

проявляется в снижении падения напряжённости магнитного поля при удалении от магнитной системы.

В XX веке на обогатительных фабриках СССР и России в основном применялась сухая магнитная сепарация с предварительной классификацией по крупности дроблёной руды с последующим раздельным обогащением мелкого и крупного продуктов (или с обогащением только крупного продукта).

В XXI веке, в связи с применением редкоземельных постоянных магнитов в сепараторостроении, позволяющих повысить магнитную силу притяжения, наметилась тенденция в отказе от предварительной классификации дроблёной магнетитовой руды по крупности и к переходу к обогащению неклассифицированной руды. Повышение индукции магнитного поля на поверхности барабана с 0,16 до 0,25 Тл позволяет повысить удельную магнитную силу, действующую на частицу с высотой 40 мм до величины, равной удельной магнитной силе, действующей на частицу с высотой 1 мм при индукции 0,16 Тл (см. рис. 2.10, а). Увеличение индукции магнитного поля сепаратора до 0,25 Тл значительно снижает потери магнетитового железа с крупными кусками руды и позволяет обогащать не классифицированную по крупности дроблёную руды при одинаковых режимах работы сепаратора (положение шибера, частота вращения барабана).

### **Влияние крупности частиц на результаты разделения в сепараторах с нижней подачей материала**

При нижней подаче материала более крупные частицы будут двигаться через более сильные участки магнитного поля, по сравнению с мелкими частицами. Расстояние  $h$  от поверхности магнитной системы (от полюса) до дальнего края частицы, движущейся по дну ванны, по полюсному наконечнику или по конвейеру (см. рис. 2.1, б), будет одинаковым как для крупной, так и для мелкой частицы. Однако расстояние  $\Delta = h - d$  (расстояние от магнитной системы до ближнего края частицы) будет большим для мелкой частицы, то есть мелкая частица будет двигаться на большем расстоянии от магнитной системы, и на неё будет действовать меньшая удельная магнитная сила, чем сила, действующая на более крупную частицу.

На рис. 2.10, б приведены зависимости удельной магнитной силы, действующей на сильномагнитные частицы различной крупности с удельной магнитной восприимчивостью  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$  в сепараторах с нижней подачей при индукции магнитного поля на поверхностях барабанов (полюсов) 0,16 (0,21) Тл и 0,25 (0,32) Тл. Удельная магнитная сила рассчитана по формуле (2.34).

Приведённые зависимости показывают увеличение удельной магнитной силы при увеличении крупности частицы. При обогащении эта закономерность должна проявиться в различной крупности магнитного и немагнитного продуктов – магнитный продукт должен быть более крупным по сравнению с немагнитным продуктом.

В табл. 2.3 приведены результаты теоретических расчётов извлечения в магнитный продукт барабанного сепаратора ПБМ-120/300 частиц магнетита, богатых, средних и бедных сростков в зависимости от их крупности [21]. Магнитная восприимчивость частиц уменьшается от частиц магнетита к частицам бедных сростков. Результаты моделирования показали, что для всех четырёх типов частиц с разными магнитными свойствами извлечение в магнитный продукт более крупных частиц внутри одного типа частиц выше, чем извлечение мелких частиц. Если сравнивать частицы с разными магнитными свойствами, например бедные и богатые сростки, то извлечение в магнитный продукт самых крупных бедных сростков выше, чем извлечение в магнитный продукт самых мелких богатых сростков (см. табл. 2.3). Таким образом, если в сепараторах с верхней подачей исходного материала немагнитный продукт более крупный, то в сепараторах с нижней подачей материала, наоборот, магнитный продукт должен быть более крупным.

Таблица 2.3

Извлечение частиц в магнитный продукт сепаратора ПБМ-120/300 (теоретические расчёты) [21, табл. 1.2]

| Крупность, мкм | Извлечение частиц в магнитный продукт, % |         |         |        |
|----------------|------------------------------------------|---------|---------|--------|
|                | магнетит                                 | сростки |         |        |
|                |                                          | богатые | средние | бедные |
| 10             | 49                                       | 35      | 19      | 8      |
| 20             | 100                                      | 76      | 62      | 26     |
| 30             | 100                                      | 100     | 76      | 50     |
| 40             | 100                                      | 100     | 100     | 63     |
| 50             | 100                                      | 100     | 100     | 80     |
| 60             | 100                                      | 100     | 100     | 92     |
| 70             | 100                                      | 100     | 100     | 95     |
| 80             | 100                                      | 100     | 100     | 100    |
| 90             | 100                                      | 100     | 100     | 100    |
| 100            | 100                                      | 100     | 100     | 100    |

При обогащении слабомагнитных руд в валковых сепараторах с нижней подачей закономерность превышения крупности магнитного продукта над крупностью немагнитного продукта проявляется в большей степени. В табл. 2.4 приведены сравнительные испытания по обогащению бедного измельчённого

продукта технологии переработки ильменитсодержащей руды на сухих сепараторах с верхней и нижней подачей материала. Результаты испытаний показали, что крупность магнитного продукта зависит от способа подачи материала в сепаратор: при нижней подаче магнитный продукт крупнее, а при верхней подаче мельче. При выборе способа подачи материала в сепаратор необходимо учитывать закономерности раскрытия и измельчаемости рудных и нерудных минералов. При измельчении ильменит-титаномagnetитовой руды ильменит концентрируется в мелких классах, а породные минералы пироксен и амфиболы концентрируются в крупных классах. Так как магнитные свойства ильменита и пироксена примерно равные, то предпочтительнее использовать сепаратор с верхней подачей материала для получения более мелкого магнитного продукта. Поэтому в рассмотренном примере сепаратор с верхней подачей материала позволил добиться большего извлечения ильменита в магнитный продукт с большей массовой долей ильменита в нём при меньшем выходе магнитного продукта.

Таблица 2.4

Технологические показатели сухой магнитной сепарации бедного ильменитсодержащего продукта

| Продукт                                          | Выход, % | Массовая доля, % |                | Извлечение ильменита, % |
|--------------------------------------------------|----------|------------------|----------------|-------------------------|
|                                                  |          | ильменита        | класса -0,2 мм |                         |
| Роликовый сепаратор с нижней подачей материала   |          |                  |                |                         |
| Магнитный                                        | 33,82    | 2,41             | 63,56          | 50,86                   |
| Немагнитный                                      | 66,18    | 1,19             | 71,48          | 49,14                   |
| Исходный                                         | 100,00   | 1,60             | 68,80          | 100,00                  |
| Барабанный сепаратор с верхней подачей материала |          |                  |                |                         |
| Магнитный                                        | 22,75    | 5,86             | 85,38          | 77,54                   |
| Немагнитный                                      | 77,25    | 0,50             | 65,63          | 22,46                   |
| Исходный                                         | 100,00   | 1,72             | 70,12          | 100,00                  |

Сепараторы с нижней подачей материала в основном применяются для обогащения измельчённых сильномагнитных железных руд и на различия в крупностях продуктов разделения влияют раскрытие и измельчаемость магнитных и немагнитных минералов в стадиях измельчения.

При обогащении сильномагнитных магнетитовых руд в мокрых барабанных сепараторах с нижней подачей закономерности различий в крупностях продуктов разделения более сложные. На крупность продуктов сепарации влияют не только закономерности раскрытия и измельчаемости магнитных и немагнитных минералов в стадиях измельчения, но и магнитная флокуляция и содержание в питании сепаратора сильномагнитных минералов (магнетита).

*Магнитная флокуляция* – образование устойчивых более крупных агрегатов из отдельных частиц намагниченного магнетита. Магнитная флокуляция проявляется в большей степени при обогащении тонкоизмельчённых (менее 0,2 мм) магнитножестких магнетитовых промпродуктов. Соединение отдельных сильномагнитных частиц в более крупные агрегаты способствует более полному извлечению магнетитового железа в магнитный продукт, так как флокулы имеют большую крупность, чем отдельные частицы. Однако вместе с магнетитом во флокулы попадают как сростки, так и отдельные частицы породных минералов, что приводит к снижению качества железного концентрата.

Рассмотрим различия в крупностях продуктов мокрой магнитной сепарации (ММС) в сепараторах с нижней подачей материала в различных операциях обогащения титаномагнетитовой руды Гусевгорского месторождения (Качканарский ГОК) [59]. На рис. 2.12 приведены зависимости извлечения классов крупности в магнитный продукт для различных операций ММС.

Извлечение крупных классов в магнитный продукт операций ММС-I и ММС-II выше, чем извлечение мелких классов, что согласуется с действием магнитной силы на частицы в сепараторах с нижней подачей материала. Исходная крупность питания не достаточна для значительного раскрытия титаномагнетита. В питании сепарации преобладают крупные сростки титаномагнетита с породными минералами и более мелкие зёрна породных минералов. Доля в питании сильномагнитных зёрен титаномагнетита недостаточна для сильного флокулообразования.

Для операций ММС-III и ММС-IV, наоборот, извлечение мелких классов в магнитный продукт выше, чем извлечение крупных классов, что не согласуется с действием магнитной силы на частицы в сепараторах с нижней подачей материала. Исходная крупность питания достаточна для значительного раскрытия титаномагнетита. В питании сепарации преобладают мелкие зёрна титаномагнетита и более крупные зёрна породных минералов. Доля в питании сильномагнитных зёрен титаномагнетита достаточна для сильного флокулообразования. Поэтому значительное превышение магнитной восприимчивости мелких зёрен титаномагнетита над магнитной восприимчивостью более крупных зёрен породных минералов и процесс флокулообразования определяют меньшую крупность магнитного продукта по сравнению с исходным продуктом.

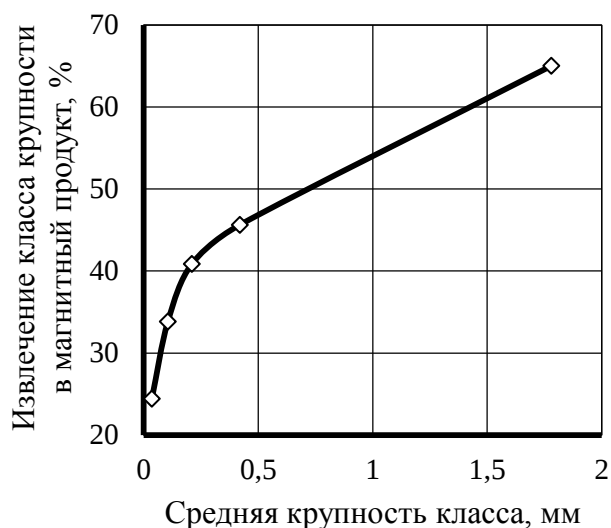
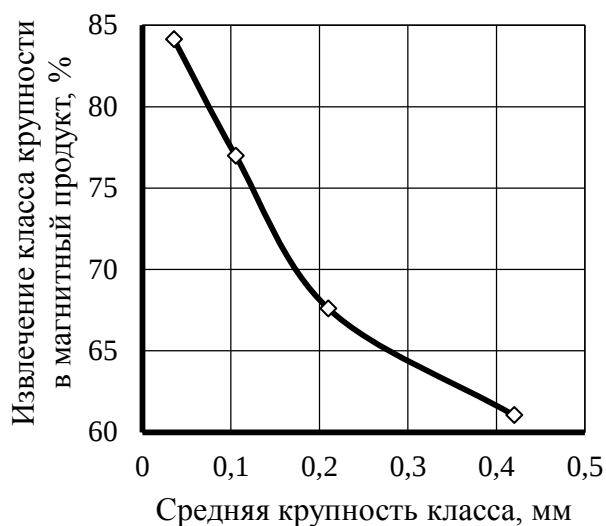
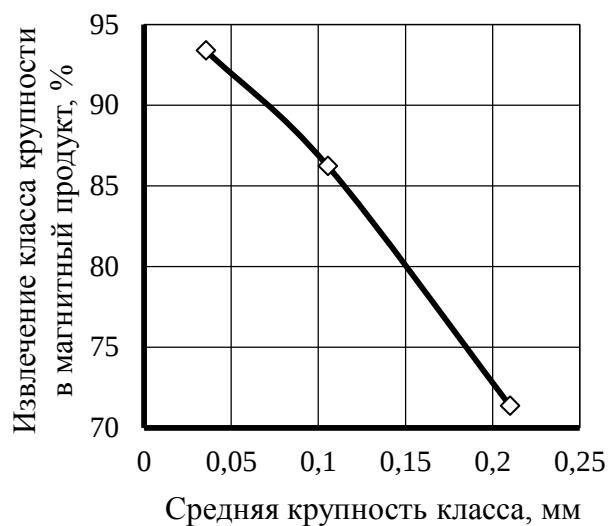
*a**б**в**г*

Рис. 2.12. Зависимость извлечений классов крупности в магнитный продукт для различных операций ММС:

*a* – ММС-I; *б* – ММС-II; *в* – ММС-III; *г* – ММС-IV

Эти выводы подтверждают значения массовых долей класса -71 мкм в питании и магнитных продуктах операций ММС обогатительной фабрики Качканарского ГОКа (табл. 2.5). В операциях ММС-I и ММС-II происходит закрупление магнитного продукта по сравнению с питанием сепараторов. В операциях ММС-III и ММС-IV, наоборот, происходит замельчение магнитного продукта по сравнению с питанием сепараторов [59].

Таблица 2.5

Массовая доля класса -71 мкм в питании и магнитном продукте операций ММС

| Стадия измельчения | Операция | Массовая доля класса -0,071 мм, % |                      |
|--------------------|----------|-----------------------------------|----------------------|
|                    |          | в питании                         | в магнитном продукте |
| I                  | ММС-I    | 18,1                              | 9,4                  |
| II                 | ММС-II   | 22,0                              | 18,9                 |
|                    | ММС-III  | 54,9                              | 58,3                 |
| III                | ММС-IV   | 74,2                              | 76,2                 |

Таким образом, при магнитной сепарации, кроме разделения по магнитным свойствам, происходит частичное разделение по крупности. Это необходимо учитывать при проектировании схем обогащения. Предварительное разделение исходного материала по крупности с целью последующего раздельного обогащения «крупного» и «мелкого» продуктов следует применять, если это будет экономически целесообразно.

## 2.5. Динамика движения частиц в магнитных сепараторах

### 2.5.1. Движение частиц руды в сухих сепараторах с верхней подачей

В сухих 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 механических 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 в зоне 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, сила тяжести, центробежная сила, сила трения (рис. 2.13).

Если рассматривать движение единичной частицы, то тангенциальная составляющая силы тяжести может вызвать скольжение частицы по поверхности барабана [13, 7, 11]. Чтобы частица не смещалась по поверхности барабана, необходимо, чтобы сила трения была больше тангенциальной составляющей силы тяжести:

$$\operatorname{tg}\varphi(f_m + g \cos \alpha - f_{\text{ц}}) \geq g \sin \alpha, \quad (2.51)$$

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

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 магнитной восприимчивости – *границей разделения* магнитного сепаратора ( $\chi_{\text{гр}}$ ). При этом частицы с величиной  $\chi > \chi_{\text{гр}}$  попадут в концентрат, а частицы с  $\chi < \chi_{\text{гр}}$  попадут в хвосты. Попадание граничной частицы в концентрат или хвосты равновероятно.

Для единичной частицы удельная магнитная сила, необходимая для извлечения граничной частицы в магнитный продукт при отсутствии скольжения, должна соответствовать условию:

$$f_m \geq f_{\text{ц}} - g \cos \alpha + \frac{g \sin \alpha}{\operatorname{tg}\varphi} = f_{\text{ц}} + \frac{g \sin(\alpha - \varphi)}{\sin \varphi}. \quad (2.52)$$

Условие (2.52) справедливо для движения единичной частицы. На практике исходную руду подают на барабан сплошным слоем. В слое материала содержатся сильномагнитные частицы, которые сильно притянуты к барабану. Эти частицы не позволяют менее богатым кускам руды смещаться по поверхности барабана (скользить) под влиянием тангенциальной составляющей силы тяжести  $g \sin \alpha$ . Кроме того, если сильномагнитная частица находится перед немагнитной частицей, то возникнет добавочная сила трения (трение между частицами), которая будет способствовать отрыву немагнитной частицы при

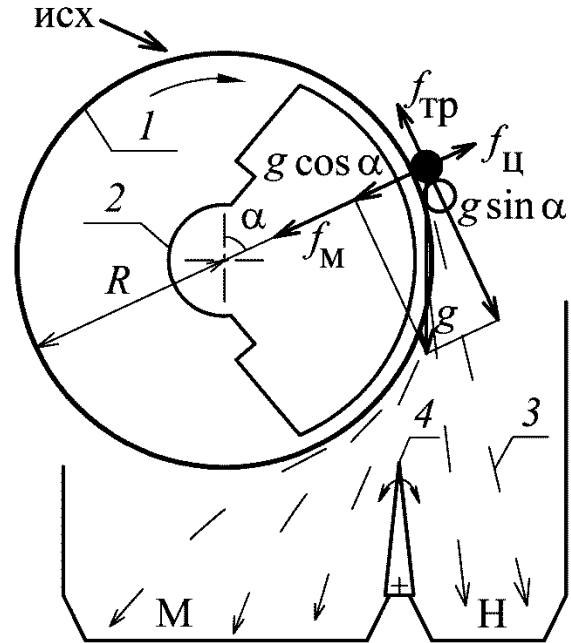


Рис. 2.13. Схема сил, действующих на частицы в магнитном сепараторе с верхней подачей материала:

1 – барабан; 2 – магнитная система; 3 – траектории движения частиц; 4 – шибер

большем угле поворота барабана. Поэтому величина удельной магнитной силы, необходимая для удержания на барабане граничных частиц, снизится. Снижение необходимой магнитной силы будет пропорционально содержанию магнитных частиц в исходном продукте. При содержании магнитных частиц в исходной руде от 0,3 до 0,9 д. ед. магнитная сила может быть найдена по выражению:

$$f_m \geq \frac{f_{ц} - g \cos \alpha}{1 + \alpha_m} \geq \frac{1}{1 + \alpha_m} \left( \frac{v^2 (R + 0,5d)^2}{R^3} - g \cos \alpha \right), \quad (2.53)$$

где  $\alpha_m$  – содержание сильномагнитных частиц в исходной руде, д. ед.

Формулу (2.53) следует считать основным соотношением, определяющим параметры и режимы работы сепаратора с верхней подачей материала при обогащении продукта с известными магнитными свойствами. Используя равенство (2.53), 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 (2.53), относятся: напряженность (индукция) магнитного поля на поверхности полюса  $H_0$  ( $B_0$ ), шаг полюсов  $S$ , расстояние от поверхности полюса до частицы  $\Delta$ , скорость вращения барабана  $v$  и его радиус  $R$ . Определение характеристик сепаратора необходимо проводить для частиц заданной крупности. Расчёт магнитной силы необходимо вести по формулам (2.32) или (2.33).

Если сухая магнитная сепарация применяется для удаления хвостов с известным значением  $\chi_{p(хв)}$ , то желательно, чтобы все бедные частицы с  $\chi < \chi_{p(хв)}$  оторвались от барабана при угле его поворота  $90^\circ$ . Из формулы (2.53) можно выразить линейную скорость вращения барабана ( $v_{хв}$ ) для этого случая [13]:

$$v_{хв} = \frac{R}{R + 0,5d} \sqrt{(1 + \alpha_m) \cdot R \cdot f_m}. \quad (2.54)$$

Если сухая магнитная сепарация применяется для получения готового концентрата с известным значением  $\chi_{p(к)}$ , то желательно, чтобы все богатые частицы с  $\chi > \chi_{p(к)}$  оторвались от барабана при угле его поворота  $180^\circ$ . Из формулы (2.53) можно выразить линейную скорость вращения барабана ( $v_k$ ) для этого случая [13]:

$$v_k = \frac{R}{R + 0,5d} \sqrt{(1 + \alpha_m) \cdot R \cdot f_m + R \cdot g}. \quad (2.55)$$

Формулы (2.54) и (2.55) носят частный характер формулы (2.53). В них входит много факторов, в том числе удельная магнитная сила. Поэтому требуемые значения скоростей будут зависеть от многих факторов. Кроме этого на практике, как удаление хвостов, так и выделение концентратов можно вести при других углах поворота барабана.

В работе [21] отмечено, что, согласно вышеприведённым формулам, угол отрыва частиц от барабана тем меньше, чем больше скорость вращения барабана, чем крупнее частица и чем меньше содержание в руде магнитной фракции. Для повышения извлечения необходимо увеличить магнитную силу, а для повышения качества концентрата необходимо увеличить центробежную силу (линейную скорость вращения барабана).

Для повышения эффективности процесса сухой магнитной сепарации в сепараторах с верхней подачей необходимо увеличить угол веера траекторий движения разделяемых частиц, а точнее – расстояние между траекториями движения немагнитной и сильномагнитной частиц после отрыва их от барабана (см. рис. 2.13). Характеристики магнитного сепаратора, обеспечивающие максимальное расстояние между траекториями движения немагнитной и сильномагнитной частиц после отрыва от барабана можно считать оптимальными при обогащении рассматриваемого продукта.

Если известно распределение частиц исходного продукта по магнитным свойствам и крупности, то, задаваясь параметрами магнитного сепаратора, можно рассчитать углы отрыва частиц от барабана. Зная угол отрыва частиц с различными свойствами от барабана, можно рассчитать траектории движения частиц и рассчитать расстояние между траекториями движения немагнитной и сильномагнитной частиц. Задаваясь координатами точки разделения частиц шибром, можно 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 выражению (2.53):

$$\alpha = \arccos \left[ \frac{(f_{ц} - f_m(1 + \alpha_m))}{g} \right]. \quad (2.56)$$

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:

$$\begin{cases} x_t = x_0 + v_{\Gamma}t; \\ y_t = y_0 + v_{\text{в}}t + \frac{gt^2}{2}, \end{cases} \quad (2.57)$$

где  $x_t$  и  $y_t$  – координаты частицы в момент времени  $t$ , м;  $x_0$  и  $y_0$  – координаты частицы в момент отрыва от барабана ( $t=0$ ), м;  $v_{\Gamma}$  и  $v_{\text{в}}$  – начальная горизонтальная и вертикальная составляющие скорости частицы в момент её отрыва от барабана, м/с.

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:

$$x_0 = R \cdot \sin \alpha; \quad y_0 = R - R \cdot \cos \alpha. \quad (2.58)$$

Начальные составляющие скорости движения частицы в момент отрыва от барабана:

$$v_{\Gamma} = v \cdot \cos \alpha; \quad v_{\text{в}} = v \cdot \sin \alpha, \quad (2.59)$$

где  $v$  – линейная скорость вращения барабана, м/с.

Задаваясь значениями координат  $x_{\text{в}}$ , находим по системе уравнений (2.57) 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 [58].

На рис. 2.14 приведены траектории движения частиц с  $\chi = 0,01 \cdot 10^{-4}$  и  $0,08 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$  после отрыва от барабана сепаратора. Крупность частиц  $d = 0,01 \text{ м}$ ; содержание сильномагнитных частиц в исходной руде  $\alpha_{\text{м}} = 0,1$ ; радиус барабана  $R = 0,45 \text{ м}$ ; коэффициент неоднородности магнитного поля  $c = 0,025 \text{ м}^{-1}$ ; расстояние между магнитной системой и частицей (воздушный зазор и футерованная обечайка барабана)  $\Delta = 10 \text{ мм}$ .

Траектории движения частиц при линейной скорости вращения барабана  $v = 1 \text{ м/с}$  и индукции магнитного поля на поверхностях барабана (полюсов)

$B=0,16$  (0,21) Тл приведены на рис. 2.14, а. Траектории движения частиц при линейной скорости вращения барабана  $v = 1,5$  м/с и индукции магнитного поля на поверхностях барабана (полюсов)  $B=0,25$  (0,32) Тл приведены на рис. 2.14, б.

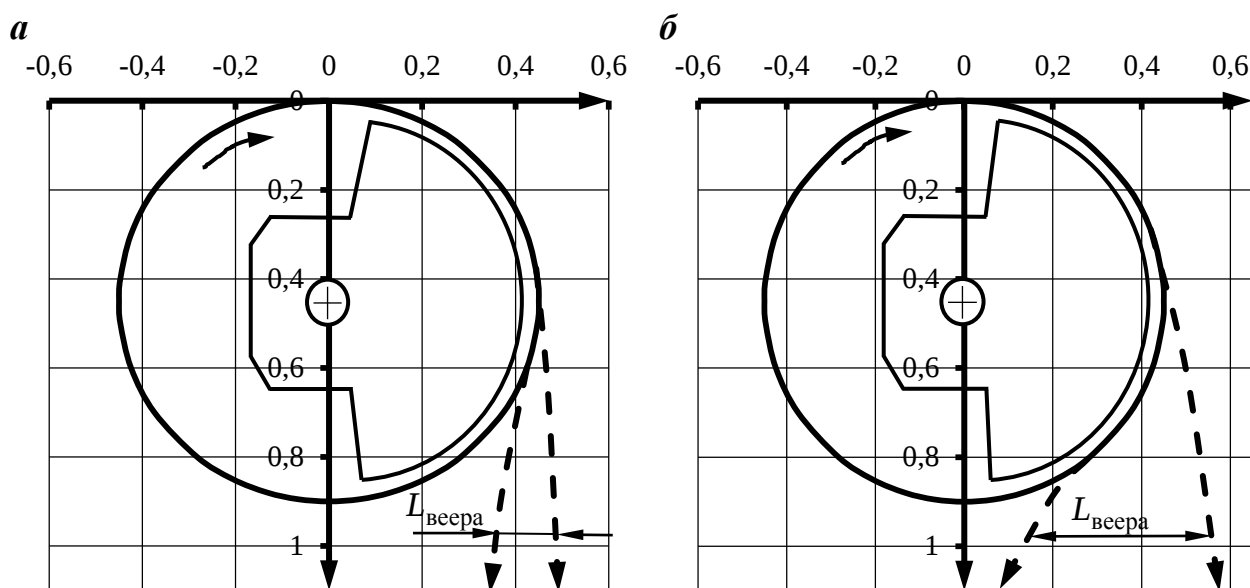


Рис. 2.14. Траектории движения частиц после отрыва от барабана сепаратора

Расчёт угла отрыва частиц от барабана и траекторий их дальнейшего движения показывает, что увеличение магнитной силы за счёт повышения индукции магнитного поля на поверхности барабана при одновременном увеличении центробежной силы за счёт повышения линейной скорости вращения барабана позволяет увеличить ширину веера ( $L_{\text{веера}}$ ), образованного движущимися частицами после их отрыва от барабана сепаратора (см. рис. 2.14).

### Пример

Частицы с размером (с высотой)  $d=30$  мм поступают в сепаратор ПБС-90/150 (см. рис. 2.13). Расстояние  $\Delta$  между частицами и рабочей поверхностью магнитной системы  $\Delta=10$  мм. Содержание сильномагнитных частиц в исходной руде  $\alpha_m=0,1$  д. ед. Линейная скорость вращения барабана сепаратора  $v=1,2$  м/с. Принять, что на частицу значимо действуют магнитная и центробежная силы и сила тяжести. Необходимо обеспечить попадание в магнитный продукт частиц с удельной магнитной восприимчивостью  $\chi_{\text{гр}} \geq 0,1 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг при угле поворота барабана  $\alpha=120^\circ$ .

Определить основные параметры магнитной системы барабанного сепаратора ПБС с верхней подачей –  $H_0$  и  $S$ . Определить напряжённость магнитного поля  $H_{10}$  на рабочей поверхности барабана при  $\Delta=10$  мм.

### Решение

При расчётах значения всех величин использовать в системе СИ. По формулам (2.34) и (2.35) рассчитываем оптимальный коэффициент неоднородности магнитного поля и опти-

мальный шаг полюсов:  $c=23,1 \text{ м}^{-1}$  и  $S=0,15 \text{ м}$ . По формуле (2.11) рассчитываем удельную центробежную силу:  $f_{ц}=3,42 \text{ Н/кг}$ .

Подставляем в выражение (2.53) вместо  $f_m$  формулу (2.32) и выводим формулу для расчёта напряжённости магнитного поля на поверхности магнитной системы. Далее выполняем расчёт:  $H_0=195,51 \text{ кА/м}$ . Напряжённость магнитного поля  $H_{10}$  на рабочей поверхности барабана при  $\Delta=x=10 \text{ мм}$  рассчитываем по формуле (2.25):  $H_{10}=155,18 \text{ кА/м}$ .

## 2.5.2. Движение частиц руды в сухих сепараторах с нижней подачей

При сухой магнитной сепарации с нижней подачей материала предполагается, что руда подаётся в зону разделения вибрационными лотками, лентами или самотёком. Задача сепарации заключается в изменении траектории магнитных частиц таким образом, чтобы на участке их пути длиной  $L$  (длина рабочей зоны разделения) они сместились на расстояние  $h$  (высота зоны разделения) и отделились бы от немагнитных частиц (рис. 2.15).

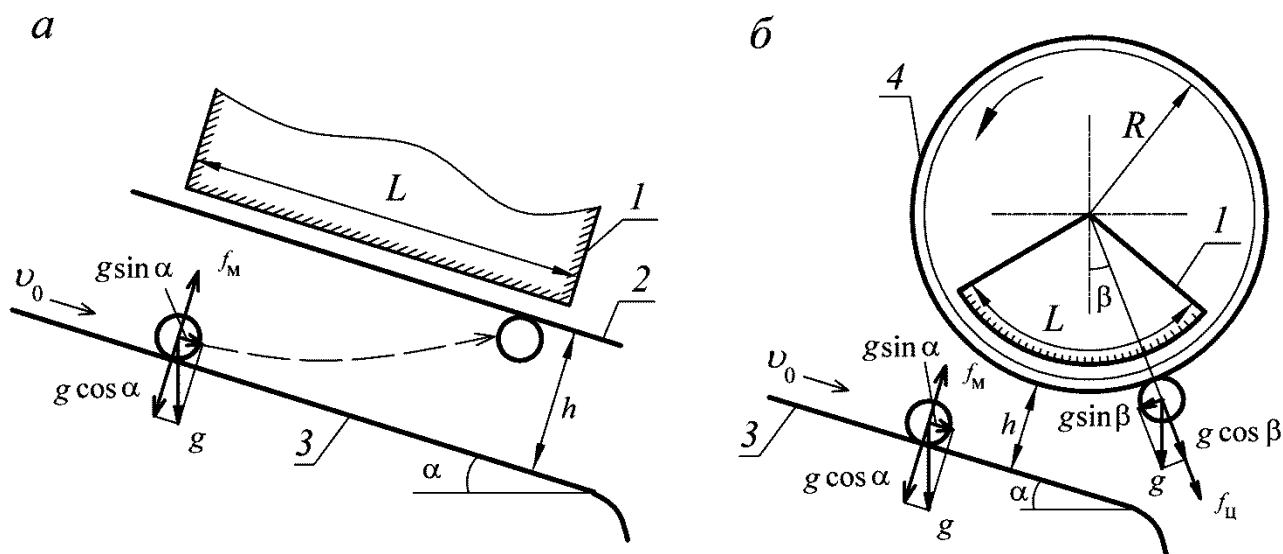


Рис. 2.15. Схема сил, действующих на частицу руды в сухих сепараторах с нижней подачей материала:

*a* – исходный и магнитный продукты перемещаются прямолинейно; *б* – исходный продукт перемещается прямолинейно, а магнитный продукт перемещается по криволинейной траектории.

1 – магнитная система; 2 – лента; 3 – лоток; 4 – барабан

В сухих сепараторах с нижней подачей материала рассматриваются три варианта перемещения исходного и магнитного продуктов через рабочую зону сепарации: исходный и магнитный продукты перемещаются прямолинейно (см. рис. 2.15, *a*); исходный продукт перемещается прямолинейно, а магнитный продукт перемещается по криволинейной траектории (см. рис. 2.15, *б*); исход-

ный и магнитный продукты перемещаются по криволинейным траекториям [13].

Наибольшее влияние на движение частиц в сухих сепараторах с нижней подачей материала оказывает магнитная сила, сила тяжести.

При большинстве расчётов необходимо определить возможность извлечения магнитных частиц из движущегося потока материала. Поэтому силу трения не учитывают, так как если магнитная частица начала движение вверх к магнитной системе, то на неё перестаёт действовать сила трения. Также для упрощения расчётов не учитывают силу сопротивления среды (воздуха). Кроме этого, принимают постоянство магнитной силы, равной магнитной силе, действующей на частицу, находящуюся на лотке. Возрастание магнитной силы по мере приближения магнитной частицы к поверхности магнитной системы не учитывают (принимают, что магнитная частица движется равноускоренно).

*Прямолинейное движение частиц исходного и магнитного продуктов через рабочую зону сепаратора (см. рис. 2.15, а)*

В работах [12, 13] принято, что на частицу значимо действуют сила тяжести и магнитная сила, частицы движутся равноускоренно.

Путь  $L$ , пройденный частицей по наклонному лотку под магнитной системой, вычисляется по формуле

$$L = v_0 t_1 + \frac{gt_1^2 \sin \alpha}{2}, \quad (2.60)$$

где  $v_0$  – начальная скорость частицы, м/с;  $t_1$  – время движения частицы под магнитной системой, с;  $\alpha$  – угол наклона лотка, град.

Путь  $h$ , пройденный частицей от наклонного лотка к магнитной системе (перпендикулярно лотку), вычисляется по формуле

$$h = \frac{(f_m - g \cdot \cos \alpha)t_2^2}{2}, \quad (2.61)$$

где  $t_2$  – время движения частицы от наклонного лотка к магнитной системе, с.

Если  $t_1 \geq t_2$ , то магнитная частица извлечётся из потока материала и притянется к магнитной системе. Используя уравнения (2.60) и (2.61) (приравнивая  $t_1$  и  $t_2$ ), можно найти величину удельной магнитной силы, необходимую для извлечения частицы в магнитный продукт:

$$f_m = g \cos \alpha + \frac{h}{L^2} (v_0^2 + Lg \sin \alpha + v_0 \sqrt{v_0^2 + 2Lg \sin \alpha}). \quad (2.62)$$

При горизонтальном или слабонаклонном перемещении руды и магнитного продукта минимальная удельная магнитная сила, необходимая для извлечения магнитных частиц:

$$f_m = g + \frac{2hv_0^2}{L^2}. \quad (2.63)$$

Теоретически допустимая скорость  $v_{\text{доп}(0)}$  движения частицы при горизонтальном или слабонаклонном её перемещении через рабочую зону сепаратора для извлечения частицы в магнитный продукт определяется из формулы (2.63):

$$v_{\text{доп}(0)} \leq L \cdot \sqrt{\frac{f_m - g}{2h}}. \quad (2.64)$$

Из равенства (2.64) следует, что большую скорость перемещения частиц и, следовательно, большую производительность сепаратора можно получить при увеличении силы магнитной системы, увеличении длины и уменьшении высоты рабочей зоны сепаратора.

После того как магнитные частицы притянутся к магнитной системе (к ленте сепаратора), они будут транспортироваться лентой в зону разгрузки магнитного продукта. Магнитные частицы от ленты не оторвутся, так как магнитная сила будет больше нормальной составляющей силы тяжести [12, 13, 67].

*Прямолинейное движение частиц исходного продукта через рабочую зону сепаратора и криволинейное перемещение магнитных частиц, после их извлечения из движущегося потока (рис. 2.15, б)*

Движение магнитных частиц для этого случая можно разделить на два этапа: подъём магнитных частиц и притяжение их к барабану или валку и транспортирование магнитных частиц барабаном или валком в зону разгрузки.

Движение частиц на первом этапе описывается уравнениями (2.60)-(2.64).

Для второго этапа (для транспортирования магнитных частиц барабаном или валком в зону разгрузки) рассчитывают величину магнитной силы, достаточную для удержания частицы на барабане или валке:

$$f_m^p \geq f_{\text{ц}} + g \cos \beta \geq \frac{v^2 (R + 0,5d)^2}{R^3} + g \cos \beta, \quad (2.65)$$

где  $f_m^p$  – удельная магнитная сила на поверхности рабочего элемента сепаратора (валка или барабана);  $\beta$  – угол, определяющий положение магнитной частицы на поверхности барабана или ролика, град.

Для второго этапа движения магнитных частиц через рабочую зону сепаратора необходимо, чтобы удельная магнитная сила  $f_m^p$  превысила равнодействующую центробежной силы и нормальной составляющей силы тяжести. Удельная магнитная сила на поверхности рабочего элемента сепаратора ( $f_m^p$ ) больше удельной магнитной силы на поверхности лотка, поэтому соотношение (2.65) обычно выполняется.

Увеличение линейной скорости вращения вала сепаратора приводит к повышению качества магнитного продукта. Однако чрезмерное увеличение числа оборотов вала сепаратора может увеличить центробежную силу, что приведёт к преждевременному отрыву магнитной частицы от вала. Поэтому возможность увеличения числа оборотов вала сепаратора необходимо проверять по соотношению (2.65) при угле  $\beta=0^\circ$ .

*Криволинейное движение частиц исходного продукта через рабочую зону сепаратора и криволинейное перемещение магнитных частиц после их извлечения из движущегося потока*

В большинстве промышленных валковых сепараторов разделяемые частицы движутся через рабочую зону сепаратора по намагничивающему полюсному наконечнику, концентричному зубчатому валку (см. рис. 2.4).

Движение магнитных частиц для этого случая можно разделить на три этапа: прямолинейное движение частиц по наклонному лотку от бункера-питателя до рабочей зоны сепаратора; движение частиц по криволинейному полюсному наконечнику, подъём магнитных частиц и притяжение их к валку; транспортирование магнитных частиц валком в зону разгрузки.

Первый этап движения частиц по наклонному лотку проходит без влияния магнитной силы. Поэтому можно использовать равенство (2.60). Для более точных расчётов следует учесть силу трения, как предлагается в работе [13]. Задачей расчёта первого этапа движения частиц является определение начальной скорости ( $v_0$ ) движения частиц при их входе в рабочую зону разделения.

Расчёт движения магнитных частиц на втором этапе предполагает добавление удельной центробежной силы в формулу (2.60), появляющейся при движении частицы по криволинейному полюсному наконечнику. Влияние центробежной силы снижает извлечение частиц в магнитный продукт. Однако движение частиц по криволинейному полюсному наконечнику приводит к постепенному снижению их скорости, что повышает извлечение частиц в магнитный продукт. Промышленный опыт эксплуатации сепараторов с криволинейным

перемещением частиц показал, что превалирует второй фактор, повышающий вероятность извлечения магнитных частиц [13].

Для упрощения расчётов для оценки необходимой магнитной силы и допустимой скорости движения частиц при их входе в рабочую зону разделения можно использовать уравнения (2.63), (2.64) [67].

На третьем этапе движения магнитных частиц (их транспортирование валком в зону разгрузки) величину магнитной силы, достаточную для удержания частицы на валке, рассчитывают по формуле (2.65).

### **2.5.3. Движение частиц руды в мокрых барабанных сепараторах с нижней подачей**

Принципиально расчёт движения частиц при мокром обогащении не отличается от расчёта движения частиц при сухом обогащении. При магнитном обогащении в водной среде необходимо дополнительно учитывать силу сопротивления среды.

В мокрых барабанных сепараторах с нижней подачей материала частицы подаются под барабан 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. 2.16). При выполнении данного условия магнитные частицы извлекнутся 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 частицы с  $\chi > \chi_p$  успеют извлекаться из потока материала независимо от их начального положения при входе в ванну сепаратора (по высоте) [58].

При мокрой магнитной сепарации и при нижней подаче материала частицы обычно перемещаются по криволинейной траектории, вдоль поверхности барабана или валка. При этом силы, действующие в нормальном к поверхности барабана направлении, будут изменяться. Нормальная составляющая силы тяжести будет зависеть от угла положения частицы  $\alpha$  относительно оси барабана. Магнитная и центробежная силы будут зависеть от расстояния  $\Delta$  от частицы до

обечайки барабана. При снижении расстояния  $\Delta$  (при движении частицы вверх) магнитная и центробежная силы будут возрастать.

Учёт изменения магнитной и центробежной сил и силы тяжести в процессе движения частицы вверх не позволяет получить аналитическое решение и требует применения численных методов решения дифференциальных уравнений на ЭВМ. Поэтому для упрощения расчётов условно примем сечение ванны в виде прямоугольника, а значение магнитной силы постоянным при  $\Delta=h$  (см. рис. 2.16). 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  $h$ ).

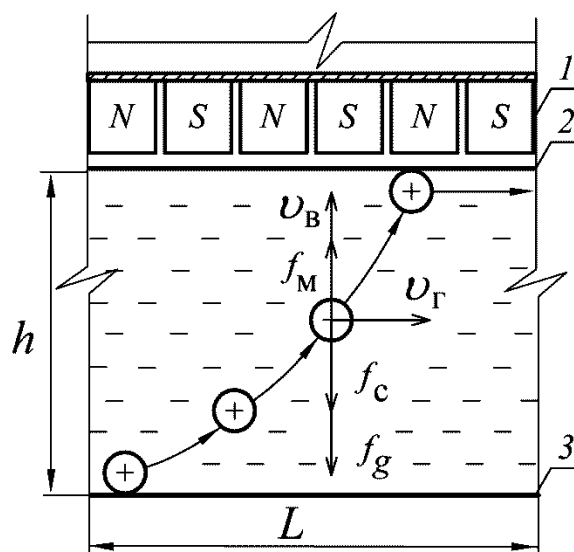


Рис. 2.16. Схема сил, действующих на частицы в мокром магнитном сепараторе с нижней подачей материала:

1 – магнитная система; 2 – обечайка барабана; 3 – дно ванны сепаратора

При таком упрощении в вертикальном направлении на частицу действуют силы: тяжести, магнитная и вязкостного сопротивления. Центробежная сила будет равна нулю.

В установившемся режиме частица движется в горизонтальном направлении со скоростью пульпы ( $v_r$ ). 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  $v_r$ .

Рассмотрим силы, действующие на частицу в ванне сепаратора в вертикальном направлении.

Удельная сила тяжести в воде, уменьшенная на величину силы Архимеда, вычисляется по формуле (2.9).

В противоположном направлении на частицу действует удельная магнитная сила, рассчитываемая по формулам (2.32) или (2.33). При движении частицы с  $\chi > \chi_{гр}$  от дна ванны к обечайке барабана удельная магнитная сила увеличивается при уменьшении  $\Delta$ . Для упрощения расчётов примем величину  $\Delta$  постоянной, равной глубине ванны  $h$ .

При перемещении частицы в пульпе возникает сила сопротивления среды, зависящая от вертикальной составляющей скорости перемещения частицы и направленная против этой скорости. Примем, что обогащаемые частицы имеют крупность менее 0,1 мм. В этом случае на частицу будет действовать сила вязкостного сопротивления. Удельная сила вязкостного сопротивления среды, согласно закону Стокса, рассчитывается по формуле (2.13).

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 удельную силу сопротивления будем рассчитывать по формуле (2.13) при значении  $\mu$  для воды. При большей крупности частиц или для магнетитовых флокулов силу сопротивления воды следует рассчитывать по законам Аллена или Риттингера (формулы (2.14), (2.15)).

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:

$$dv_b/dt = f_m - f_g - f_c. \quad (2.66)$$

Заменим  $f_m - f_g$  на  $a$  и  $18\mu/(pd^2)$  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:

$$y_t = \frac{a}{b} \left( t + \frac{e^{-tb}}{b} \right) - \frac{a}{b^2}, \quad (2.67)$$

где  $t$  – текущее время, с;  $y_t$  – текущая координата частицы, м.

Примем, что в вертикальном направлении частица прошла путь  $y_t = h$ . Для притяжения частицы к барабану сепаратора необходимо, чтобы частица в горизонтальном направлении за то же время  $t$  прошла путь, меньший или равный  $L$ . Время, за которое частица пройдет путь  $L$ :

$$t = L/v_r. \quad (2.68)$$

Подставим в формулу (2.67) вместо  $y_t$  величину  $h$ , вместо  $t$  зависимость (2.68), а вместо  $a$  – разность  $f_m - f_g$  и выразим значение магнитной силы:

$$f_m \geq f_g + h / \left[ \frac{1}{b} \left( \frac{L}{v_r} + \frac{e^{-\frac{L}{b}}}{b} - \frac{1}{b} \right) \right], \quad (2.69)$$

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

Величина  $f_m$ , рассчитанная по формуле (2.69), 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 (2.69) 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 (2.69), 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 (2.69), относятся: напряженность магнитного поля на поверхности полюса  $H_0$ , шаг полюсов  $S$ , расстояние от поверхности полюса до верхней границы частицы  $\Delta$ , скорость движения пульпы  $v_t$  (определяет производительность), длина и высота рабочей зоны разделения ( $L$  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 (2.67) и  $x_t = v_t t$ .

Для повышения точности расчётов магнитную силу необходимо определять по равенствам (2.32) или (2.33) при условии уменьшения  $\Delta$ , 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 магнит-

ной силы, и коэффициент динамической вязкости  $\mu$  будет зависеть от содержания твердого в пульпе и других факторов, что также можно учесть для повышения точности расчетов [58].

### **Пример**

Частица с размером  $d=0,07$  мм движется в ванне сепаратора ПБМ-ПП-90/250 (см. рис. 2.16). Расстояние  $\Delta$  между частицей и поверхностью барабана (глубина ванны)  $\Delta=h=50$  мм. Поправочный коэффициент, связанный с флокулообразованием тонких частиц, принять:  $a=2$ . Шаг полюсов (по поверхности барабана)  $S=0,15$  м. Напряжённость магнитного поля на поверхности барабана  $H_0=128$  кА/м. Длина рабочей зоны ванны  $L=0,6$  м. Плотность частиц  $\rho=4500$  кг/м<sup>3</sup>. Скорость пульпы (частиц) в горизонтальном направлении  $v_r = 0,5$  м/с.

Определить величину минимального значения удельной магнитной восприимчивости частицы ( $\chi_{гр}$ ), при которой частица попадёт в магнитный продукт.

### **Решение**

При расчётах значения всех величин использовать в системе СИ.

По формуле (2.9) рассчитываем удельную силу тяжести в воде  $f_g=7,63$  Н/кг. Рассчитываем коэффициент  $b=18\mu/(\rho d^2)=818,33$  с<sup>-1</sup>. По формуле (2.69) рассчитываем минимальное значение удельной магнитной силы, необходимой для извлечения частицы в магнитный продукт:  $f_m=41,68$  Н/кг. По формуле (2.28) рассчитываем коэффициент неоднородности поля:  $c=23,17$  м<sup>-1</sup>.

Используя формулу (2.32), выводим формулу для расчёта минимального значения удельной магнитной восприимчивости частицы, при которой частица попадёт в магнитный продукт, и выполняем расчёт:  $\chi_{гр}=0,00044=4,4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг.

## **2.6. Физические основы феррогидростатической сепарации**

Процесс феррогидростатической (ФГС) сепарации относится к магнито-гидростатической (МГС) сепарации. В настоящее время процесс магнито-гидростатической сепарации в основном осуществляется в ферромагнитной жидкости (ФМЖ), поэтому чаще используется термин «феррогидростатическая сепарация».

Признаком разделения при магнито-гидростатическом (МГС) обогащении, как и при тяжелосредном обогащении, является плотность. Частицы разделяемого материала, имеющие плотность выше эффективной плотности магнитной жидкости опускаются на дно ванны сепаратора, а частицы, имеющие более низкую плотность, поднимаются на поверхность жидкости. Особенностью магнито-гидростатического разделения является то, что требуемая кажущаяся плотность магнитной жидкости (до 20000 кг/м<sup>3</sup>) достигается под воздействием внешнего магнитного поля, что накладывает определённые ограничения на

процесс, в частности – на рабочий объем зоны разделения, который определяет производительность сепаратора.

Феррогидростатическое обогащение осуществляется в среде, имеющей повышенные магнитные свойства. Поэтому основной силой, обеспечивающей процесс феррогидростатической сепарации и достижение необходимой эффективной плотности разделения, является выталкивающая магнитная сила. Удельное значение этой силы (отнесённое к массе) при незначительном объёме частицы

$$f_{\text{вм}} = \mu_0 \mu_{\text{ФМЖ}} (\chi_{\text{ч}} - \chi_{\text{ФМЖ}}) H \text{grad} H, \quad (2.70)$$

где  $\mu_{\text{ФМЖ}}$  – магнитная проницаемость (относительная) ферромагнитной жидкости;  $\chi_{\text{ч}}$  и  $\chi_{\text{ФМЖ}}$  – удельная магнитная восприимчивость частицы и ферромагнитной жидкости,  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

Если  $\chi_{\text{ч}} > \chi_{\text{ФМЖ}}$ , то частица будет двигаться в сторону увеличения магнитного поля (в направлении повышения градиента поля). На практике такая частица будет двигаться вниз в сторону уменьшения межполюсного зазора и к полюсу (см. рис. 1.1, д). Частицы с  $\chi_{\text{ч}} > \chi_{\text{ФМЖ}}$  нарушают процесс феррогидростатической сепарации, поэтому их удаляют из питания сепаратора.

При  $\chi_{\text{ФМЖ}} > \chi_{\text{ч}}$  не частица, а магнитная жидкость будет втягиваться в участки поля с большей напряжённостью, и магнитная сила будет выталкивать немагнитные частицы в участки поля с меньшей напряжённостью. Такую магнитную силу называют выталкивающей. Если  $\chi_{\text{ФМЖ}} > \chi_{\text{ч}}$ , то частица будет двигаться в сторону уменьшения магнитного поля (в направлении, противоположном повышению градиента поля). На практике такая частица будет двигаться вверх, в сторону уменьшения межполюсного зазора, и всплывать (не тонуть) в магнитной жидкости (см. рис. 1.1, д).

Выталкивающая магнитная сила определяет величину эффективной плотности (квазиплотности) магнитной жидкости, которая будет определять границу разделения частиц по плотности. При этом часто говорят о «магнитном повышении» плотности среды, что не соответствует действительности, так как физическая плотность магнитной жидкости не изменяется. Эффективная плотность магнитной жидкости не является физической величиной. Этот термин введён для упрощения оценки основного технологического режима ФГС-сепаратора, так как разделение частиц осуществляется по плотности. В ФГС-сепараторах осуществляют разделение диамагнитных и немагнитных частиц, у которых  $\chi_{\text{ч}} \rightarrow 0$ , чтобы разделение велось только по плотности.

Низкая производительность ФГС-сепараторов (до 2 т/ч) и высокая себестоимость процесса обуславливают следующие области применения:

1. Разделение дроблёных немагнитных вторичных цветных металлов.
2. Выделение благородных металлов из промпродуктов переработки россыпных месторождений и из отходов металлургического производства.
3. Исследование полезных ископаемых и других продуктов на обогатимость методом фракционирования по плотности.

Первое направление использования благодаря регулированию плотности магнитной жидкости в широком диапазоне (2000-20000 кг/м<sup>3</sup>) позволяет разделять как лёгкие и близкие по плотности цветные металлы и сплавы (например, алюминий и его сплавы), так и тяжёлые металлы и сплавы (медь, свинец и др.).

Второе направление достаточно широко используется на шлиходоводочных фабриках для получения золота и платины из труднообогатимых продуктов переработки россыпных месторождений. Также ФГС-сепарация нашла применение при обогащении дроблёных шлаков, содержащих благородные металлы.

Третье направление позволит заменить тяжёлые токсичные жидкости, применяемые в исследовании на обогатимость углей и руд и, кроме того, увеличит количество типов руд и продуктов, исследуемых на обогатимость методом фракционирования по плотности благодаря высоким достигаемым и регулируемым плотностям ферромагнитных жидкостей.

Для рудного сырья феррогидростатическое обогащение не применяется в связи с низкой производительностью сепараторов и высокой себестоимостью процесса [51].

В табл. 2.6 приведены некоторые свойства металлов и сплавов, определяющие возможность применения феррогидростатического обогащения (плотность и удельная магнитная восприимчивость).

Различия в плотностях различных металлов и сплавов позволяют разделять их по плотности в магнитных жидкостях (например, Cu – Pb). Высокая плотность металлов позволяет разделять металлы и неметаллы или металлы и минералы или другие соединения (например, Au – другие минералы).

Минералы и металлы, подвергающиеся феррогидростатическому обогащению, должны быть немагнитными или диамагнитными. Практически все металлы удовлетворяют этому требованию, кроме сильномагнитного (ферромагнитного) железа и слабомагнитных (парамагнитных) марок бронз и латуней.

Сильномагнитные и слабомагнитные металлы, сплавы и минералы должны предварительно удаляться из питания феррогидростатических сепараторов.

Таблица 2.6

Физические свойства металлов и сплавов [51]

| Металл   | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Удельная магнитная восприимчивость, м <sup>3</sup> /кг | Удельная электрическая проводимость, 10 <sup>6</sup> См/м |
|----------|------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Алюминий | 2700                         | $0,58 \cdot 10^{-9}$                                   | 35,7                                                      |
| Медь     | 8930                         | $-0,086 \cdot 10^{-9}$                                 | 57,1                                                      |
| Бронза   | 7500-8900                    | $(-0,04 - 130) \cdot 10^{-7}$                          | 12,5                                                      |
| Латунь   | 8300-8700                    | $(-0,07 - 31) \cdot 10^{-7}$                           | 16,7 – 40                                                 |
| Свинец   | 11350                        | $-0,12 \cdot 10^{-9}$                                  | 4,5                                                       |
| Олово    | 7290                         | $0,03 \cdot 10^{-9}$                                   | 8,7                                                       |
| Серебро  | 10500                        | $-0,19 \cdot 10^{-9}$                                  | 62,5                                                      |
| Золото   | 19310                        | $-0,155 \cdot 10^{-9}$                                 | 41 – 48,8                                                 |
| Платина  | 21460                        | $0,73 \cdot 10^{-9}$                                   | 9,3 – 10,6                                                |
| Цинк     | 7150                         | $-0,14 \cdot 10^{-9}$                                  | 16,9                                                      |
| Железо   | 7880                         | $4,59 \cdot 10^{-2}$                                   | 10,2                                                      |

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

### Магнитные жидкости и способы их получения

Магнитные жидкости, применяемые в качестве разделительной среды можно разделить на пара- и ферромагнитные. Сепараторы, в которых используется ферромагнитная жидкость, называются феррогидростатическими, а в которых используется парамагнитная жидкость – магнитоидростатическими. Это разделение довольно условно, так как конструкция аппарата практически не зависит от типа применяемой жидкости.

Парамагнитные жидкости представляют собой водные растворы парамагнитных солей железа, марганца, никеля и кобальта, а также редких земель.

Магнитные свойства парамагнитных растворов зависят от концентрации растворенного в воде парамагнетика, что повышает и их плотность. В табл. 2.7 приведены свойства некоторых парамагнитных жидкостей.

Таблица 2.7

**Физические свойства некоторых парамагнитных жидкостей  
(насыщенные растворы) [5, 51]**

| Парамагнитная<br>жидкость          | Плотность,<br>кг/м <sup>3</sup> | Вязкость,<br>10 <sup>-3</sup> Па·с | Объемная магнит-<br>ная восприимчи-<br>вость, 10 <sup>-6</sup> æ | Удельная маг-<br>нитная воспри-<br>имчивость,<br>10 <sup>-6</sup> м <sup>3</sup> /кг |
|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| GdBr <sub>3</sub>                  | 1500                            | 11,3                               | 306                                                              | 0,204                                                                                |
| EuBr <sub>3</sub>                  | 1800                            | 8,85                               | 76                                                               | 0,042                                                                                |
| HoBr <sub>3</sub>                  | 1750                            | 8,15                               | 528                                                              | 0,302                                                                                |
| TbBr <sub>3</sub>                  | 2200                            | 14,8                               | 528                                                              | 0,240                                                                                |
| DyCl <sub>3</sub>                  | 1600                            | 6,0                                | 728                                                              | 0,455                                                                                |
| Ni(ClO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 1600                            | 3,84                               | 62                                                               | 0,039                                                                                |
| MnCl <sub>2</sub>                  | 1450                            | 7,35                               | 332                                                              | 0,229                                                                                |
| Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>  | 1650                            | 4,15                               | 400                                                              | 0,242                                                                                |
| NiCl <sub>2</sub>                  | 1450                            | 5,35                               | 80                                                               | 0,055                                                                                |
| ErBr <sub>3</sub>                  | 1750                            | 8,75                               | 920                                                              | 0,541                                                                                |
| Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>  | 1600                            | 6,4                                | 110                                                              | 0,069                                                                                |
| FeCl <sub>3</sub>                  | 1400                            | -                                  | 166                                                              | 0,119                                                                                |
| Co(BF <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>  | 1500                            | -                                  | 134                                                              | 0,089                                                                                |
| MnBr <sub>2</sub>                  | 1700                            | -                                  | 356                                                              | 0,209                                                                                |
| DyBr <sub>3</sub>                  | 1500                            | -                                  | 224                                                              | 0,149                                                                                |

Наибольшее применение получили ферромагнитные жидкости (ФМЖ), создаваемые искусственно. Они имеют сложную структуру и включают жидкость-носитель, частицы ферромагнетика и поверхностно-активные вещества (ПАВ). В качестве жидкости-носителя можно использовать керосин, воду, толуол, а также бензол, ацетон, парафиновое и силиконовые масла и т.д. (табл. 2.8). Наибольшее распространение получили ФМЖ на основе керосина.

Таблица 2.8

**Характеристика жидкостей-носителей [5]**

| Жидкость | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Вязкость, 10 <sup>-3</sup> Па·с |
|----------|------------------------------|---------------------------------|
| Керосин  | 819                          | 1,49                            |
| Толуол   | 867                          | 0,61                            |
| Ацетон   | 790                          | 0,73                            |
| Бензол   | 879                          | 0,67                            |
| Вода     | 1000                         | 1,00                            |

Жидкость-носитель может быть как диа-, так и парамагнетиком. В реальных условиях при достижимых магнитных полях жидкость-носитель можно считать немагнитной, например, объемная магнитная восприимчивость керосина составляет  $0,72 \cdot 10^{-6}$ , а удельная магнитная восприимчивость –  $0,96 \cdot 10^{-9}$ , что позволяет отнести керосин к немагнитным жидкостям. Магнитные свойства

ФМЖ определяются свойствами частиц магнитного материала коллоидных размеров. Другие физические свойства ФМЖ повторяют в основном характеристики жидкости-носителя.

Частицы ферромагнетика можно получать из магнитных материалов, характеризующихся сильными магнитными свойствами. Наиболее распространенный ферромагнитный материал для изготовления ФМЖ – тонкодисперсный магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Ферромагнитные жидкости на основе магнетита обладают рядом преимуществ: они имеют повышенные магнитные свойства, большую устойчивость как в магнитном поле, так и при длительном хранении без магнитного поля, их легче и дешевле можно получать в промышленном масштабе, по сравнению с другими жидкостями.

При получении ферромагнитных жидкостей возникает ряд технических трудностей, главная из которых состоит в сложности перевода высокодисперсного магнитного материала в коллоидное состояние в жидкости-носителе. При этом большое значение имеют защита поверхности твердых частиц от окисления и предотвращения процессов коагуляции. Поэтому для стабилизации магнитных частиц в жидкости-носителе используют ПАВ.

Сложные молекулы ПАВ обволакивают частицы ферромагнетика и образуют защитный (сольватный) слой. Это препятствует сближению частиц ферромагнетика под действием молекулярных сил при броуновском движении и их слипанию под действием диполь-дипольного взаимодействия, что в конечном итоге предотвращает процесс коагуляции. В качестве ПАВ можно использовать спирты, мыла, жирные кислоты. Для стабилизации ферромагнитных частиц из магнетита используют насыщенную олеиновую кислоту, имеющую плотность  $895 \text{ кг/м}^3$ .

Сложности при получении ФМЖ связаны с достижением высокой дисперсности ферромагнетика – магнетита  $((8-10) \cdot 10^{-9} \text{ м})$ . Коллоидного состояния магнетита для жидкостей можно достичь как измельчением грубодисперсного магнетита в присутствии жидкости-носителя и ПАВ, так и осаждением и пептизацией высокодисперсного магнетита в жидкости-носителе, содержащей поверхностно-активное вещество. Первый метод (измельчение) не нашёл широкого применения.

Метод осаждения основан на получении высокодисперсного магнетита действием щелочи или аммиака на водный раствор солей двух- и трехвалентного железа с последующей его пептизацией в жидкости-носителе, содержащем ПАВ.

Рассмотрим подробно один из способов получения ФМЖ на основе керосина [5]. Смесь водных растворов солей двух- и трехвалентного железа группы сульфатов и хлоридов в молярном соотношении 1:2 вводят при температуре окружающей среды и перемешивании в раствор аммиака, взятого с избытком. Образовавшуюся смесь отстаивают 1,5-2 ч и декантируют жидкость, после чего для покрытия частиц магнетита ПАВ вводят олеиновую кислоту, расход которой составляет 1-20 % массы магнетита. Для экстракции частиц магнетита, покрытых ПАВ, в углеводородную среду вводят керосин из расчета 1 см<sup>3</sup> керосина на 1-1,5 г магнетита. Полученную смесь перемешивают и нагревают для разложения аммонированного ПАВ (70-100 °С). Образовавшуюся углеводородную суспензию коллоидных частиц магнетита отделяют, например, отстаиванием. Полученная данным способом ферромагнитная жидкость обладает следующими физическими свойствами: намагниченность около 70 кА/м, плотность 1830 кг/м<sup>3</sup>.

Известны способы получения магнитных жидкостей на основе воды, которые показали принципиальную возможность создания устойчивых коллоидов. Однако процесс получения этих жидкостей пока довольно продолжительный и дорогой [5].

### **Эффективная плотность ферромагнитной жидкости в магнитном поле**

Без воздействия внешнего магнитного поля плотность ФМЖ определяется плотностью жидкости-носителя и концентрацией твердой фазы (магнетита). Плотность керосина 819 кг/м<sup>3</sup>, магнетита 5000 кг/м<sup>3</sup>. Обычно плотность (физическая)готавливаемых ФМЖ не превышает 1300 кг/м<sup>3</sup>.

Кажущаяся плотность ФМЖ в рабочем пространстве МГС-сепаратора значительно выше физической плотности. Ее можно определить

$$\rho_{\text{эф}} = \rho_{\text{ФМЖ}} + \rho_{\text{мп}}, \quad (2.71)$$

где  $\rho_{\text{эф}}$  – эффективная или кажущаяся плотность ФМЖ (квазиплотность) в магнитном поле, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ФМЖ}}$  – плотность магнитной жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{мп}}$  – кажущийся прирост плотности ФМЖ, вызванный действием внешнего магнитного поля, кг/м<sup>3</sup>.

Если рассматривать ФМЖ, помещенную в магнитное поле, как однородную среду, то выталкивающую силу, действующую на частицу, можно определить:

$$F = F_a + F_{\text{вм}}, \quad (2.72)$$

где  $F_a$  и  $F_{\text{вм}}$  – сила Архимеда и выталкивающая сила, связанная с действием на ФМЖ магнитного поля (дополнительная сила Архимеда), Н.

Подставим в формулу (2.72) выражения для  $F$ ,  $F_a$  и  $F_{\text{ам}}$  и вычислим  $\rho_{\text{эф}}$ :

$$\begin{aligned} V \cdot \rho_{\text{эф}} \cdot g &= V \cdot \rho_{\text{ФМЖ}} \cdot g + V \cdot \rho_{\text{ФМЖ}} \cdot f_{\text{вм}}; \\ \rho_{\text{эф}} &= \rho_{\text{ФМЖ}} + \rho_{\text{ФМЖ}} \cdot f_{\text{вм}} / g; \\ \rho_{\text{эф}} &= \rho_{\text{ФМЖ}} \cdot (1 + f_{\text{вм}} / g). \end{aligned} \quad (2.73)$$

Для увеличения эффективной плотности ФМЖ в два раза необходимо, чтобы удельная выталкивающая магнитная сила равнялась  $g$ , в десять раз – чтобы  $f_{\text{вм}}$  в девять раз превышала  $g$ .

Значение удельной выталкивающей магнитной силы при условии  $\chi_{\text{ч}} \rightarrow 0$  можно рассчитать по формулам (2.33) или (2.34) с добавлением в эти формулы магнитной проницаемости ФМЖ (относительной), например:

$$f_{\text{вм}} = \frac{\mu_0 \mu_{\text{ФМЖ}} (\chi_{\text{ч}} - \chi_{\text{ФМЖ}}) H_0^2}{2d} e^{-2c\Delta} (1 - e^{-2cd}), \quad (2.74)$$

где  $\mu_{\text{ФМЖ}}$  – магнитная проницаемость ФМЖ (относительная).

Процесс феррогидростатической сепарации применяют для немагнитных или диамагнитных частиц, для которых можно принять  $\chi_{\text{ч}} \rightarrow 0$ . При этом разница  $\chi_{\text{ФМЖ}} - \chi_{\text{ч}}$  будет стремиться к  $\chi_{\text{ФМЖ}}$ . Для таких частиц выталкивающая магнитная сила будет максимальна и будет получено максимальное значение  $\rho_{\text{эф}}$ .

Чем ближе величина  $\chi_{\text{ч}}$  будет к значению  $\chi_{\text{ФМЖ}}$ , тем ниже будет выталкивающая магнитная сила и ниже значение  $\rho_{\text{эф}}$ . Если  $\chi_{\text{ФМЖ}} < \chi_{\text{ч}}$ , то магнитная сила будет не выталкивать частицу на поверхность жидкости, а, наоборот, втягивать частицу в зону максимального магнитного поля (в зону минимального межполюсного зазора). Частицы с  $\chi_{\text{ч}} > \chi_{\text{ФМЖ}}$  феррогидростатическому обогащению не подвергают, их заранее удаляют с помощью магнитной сепарации.

Анализируя формулу (2.73), отметим, что плотность разделения, которую можно достичь при ФГС-обогащении, зависит от двух величин: 1 – магнитных свойств жидкости, которые определяет массовая доля ферромагнетика (магнетита) в ФМЖ; 2 – удельной выталкивающей магнитной силы ( $H \text{grad} H$  магнитной системы).

### **Магнитные свойства ферромагнитной жидкости**

Массовая доля магнетита в ФМЖ прямо пропорционально влияет на плотность  $\rho_{\text{ФМЖ}}$  и на  $\mu_{\text{ФМЖ}}$  или  $\chi_{\text{ФМЖ}}$ . По экспериментальным кривым намагниченности ФМЖ, приведённым в работе [5, рис. 3], рассчитаны объёмная и

удельная магнитная восприимчивости ФМЖ в зависимости от плотности (массовой доли магнетита) и напряжённости внешнего магнитного поля (табл. 2.9). Значения объемной и удельной магнитной восприимчивостей ФМЖ, приведённые в табл. 2.9, рассчитаны по формулам:  $\alpha_{\text{ФМЖ}} = J/H$ ;  $\chi_{\text{ФМЖ}} = \alpha_{\text{ФМЖ}}/\rho_{\text{ФМЖ}}$ .

Таблица 2.9

Магнитные свойства ФМЖ (керосин-магнетит-ПАВ) [5, 51]

| Напряженность намагничивающего поля $H$ , кА/м | Плотность ФМЖ, кг/м <sup>3</sup> | Намагниченность $J$ , кА/м | Объемная магнитная восприимчивость $\alpha_{\text{ФМЖ}}, 10^{-3}$ | Удельная магнитная восприимчивость $\chi_{\text{ФМЖ}}, 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$ |
|------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 200                                            | 860                              | 2,2                        | 11,0                                                              | 1,30                                                                                  |
|                                                | 885                              | 4,0                        | 20,0                                                              | 2,30                                                                                  |
|                                                | 920                              | 5,2                        | 26,0                                                              | 2,80                                                                                  |
| 400                                            | 860                              | 3,0                        | 7,5                                                               | 0,87                                                                                  |
|                                                | 885                              | 5,1                        | 12,8                                                              | 1,44                                                                                  |
|                                                | 920                              | 6,5                        | 16,3                                                              | 1,77                                                                                  |
| 600                                            | 860                              | 3,2                        | 5,3                                                               | 0,62                                                                                  |
|                                                | 885                              | 5,5                        | 9,2                                                               | 1,04                                                                                  |
|                                                | 920                              | 7,0                        | 11,7                                                              | 1,27                                                                                  |
| 800                                            | 860                              | 3,3                        | 4,1                                                               | 0,48                                                                                  |
|                                                | 885                              | 5,6                        | 7,0                                                               | 0,79                                                                                  |
|                                                | 920                              | 7,0                        | 8,8                                                               | 0,96                                                                                  |

Магнитная восприимчивость ферромагнитных жидкостей (см. табл. 2.9) на порядок выше, чем магнитная восприимчивость парамагнитных жидкостей (табл. 2.7). Это говорит о том, что при использовании ФМЖ можно достичь более высокого значения эффективной плотности жидкости (граничной плотности) по сравнению с использованием парамагнитной жидкости при той же магнитной системе сепаратора. Это, а также экономические и экологические факторы предопределили использование в промышленности в основном ферромагнитных жидкостей и ФГС-сепараторов.

Увеличение концентрации магнетита или другого ферромагнетика в жидкости-носителе влечет за собой повышение плотности, намагниченности и магнитной восприимчивости (удельной и объемной) ФМЖ. Намагниченность ФМЖ заметно возрастает при увеличении напряженности внешнего магнитного поля до 400 кА/м. При дальнейшем повышении напряженности магнитного поля ФМЖ переходит в состояние магнитного насыщения, что проявляется в снижении роста ее намагниченности и, как следствие, в снижении магнитной восприимчивости. С ростом напряженности магнитного поля снижается удельная и объемная магнитная восприимчивость ФМЖ. Напряженность магнитного поля сепаратора ФГС-70 составляет 320-400 кА/м. Для этой напряжен-

ности удельная магнитная восприимчивость ФМЖ (в зависимости от концентрации магнетита) порядка  $1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$  (см. табл. 2.9).

Так как магнитные свойства ФМЖ зависят от концентрации твердых частиц (магнетита), то необходимо знать концентрацию твердой фазы. Объемная концентрация, %:

$$\alpha_{\text{об}} = 100 \cdot (\rho_{\text{ФМЖ}} - \rho_{\text{жн}}) / (\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{жн}}), \quad (2.75)$$

где  $\rho_{\text{ФМЖ}}$ ,  $\rho_{\text{жн}}$ ,  $\rho_{\text{м}}$  – плотности (физические) ФМЖ, жидкости-носителя (керосина) и твердой фазы (магнетита) соответственно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Массовая доля твердой фазы в ФМЖ связана с объемной долей соотношением, %:

$$\alpha_{\text{мас}} = \alpha_{\text{об}} \cdot \rho_{\text{м}} / \rho_{\text{ФМЖ}}. \quad (2.76)$$

Расчеты по формулам (2.75) и (2.76) при  $\rho_{\text{м}} = 5000 \text{ кг}/\text{м}^3$  дают при ФМЖ плотностью 860; 885; 920  $\text{кг}/\text{м}^3$  объемную и массовую долю твердой фазы (магнетита): 1; 1,5; 2,4 % и 5,8; 8,5; 10,9 % соответственно.

Приближенно объемную магнитную восприимчивость ФМЖ можно определить по формуле Бринга (представив ФМЖ как сросток немагнитного материала с магнетитом):

$$\alpha_{\text{ФМЖ}} = \alpha_{\text{мас}}^2 \cdot \alpha_{\text{м}} \cdot 10^{-4}, \quad (2.77)$$

где  $\alpha_{\text{м}}$  – объемная магнитная восприимчивость магнетита.

Объемная магнитная восприимчивость ФМЖ с плотностями 860, 885 и 920  $\text{кг}/\text{м}^3$  при напряженности магнитного поля 200  $\text{кА}/\text{м}$ , рассчитанная по формуле (2.76), равна соответственно  $7,1 \cdot 10^{-3}$ ;  $15,2 \cdot 10^{-3}$  и  $25,0 \cdot 10^{-3}$ . При расчете  $\alpha_{\text{м}} = 2,1$  определена по данным, приведённым в работе [13, табл. 1].

### **Удельная магнитная сила и её влияние на эффективную плотность ферромагнитной жидкости**

Согласно равенству (2.73), для повышения эффективной плотности ФМЖ (для повышения границы разделения) в рабочей зоне сепаратора необходимо увеличивать удельную магнитную силу магнитной системы сепаратора  $H_{\text{gradH}}$ .

Для сепараторов с электромагнитной системой величиной  $H_{\text{gradH}}$  управляют изменением силы тока, подаваемого в электромагнитную систему, или, если есть техническая возможность, изменением межполюсного зазора. У сепараторов с системой из постоянных магнитов величину  $H_{\text{gradH}}$  можно изменять, только варьируя межполюсным зазором. Для обоих типов магнитных систем сепараторов эффективную плотность ФМЖ можно изменять путём использова-

ния жидкости с различной массовой долей магнетита (с различной плотностью).

На рис. 2.17 приведены эффективные плотности ФМЖ, достигаемые в сепараторе ФГС-1 в зависимости от свойств ФМЖ и параметров сепаратора [5].

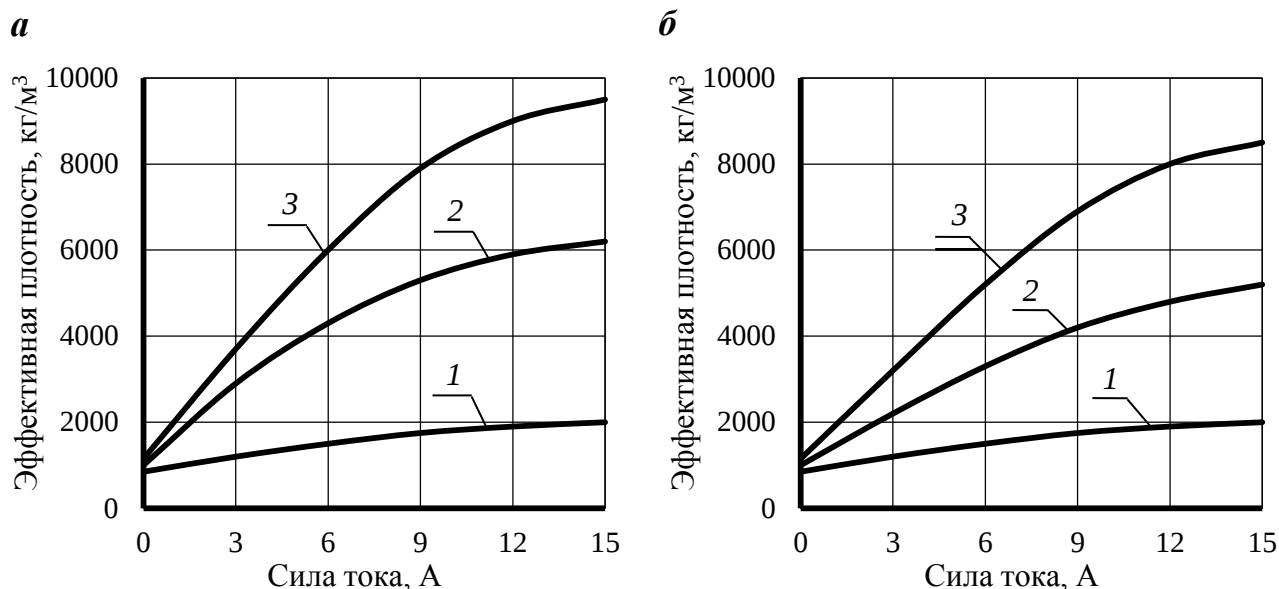


Рис. 2.17. Зависимость эффективной плотности ФМЖ от силы тока в обмотках электромагнита сепаратора ФГС-1:

*а* – межполюсный зазор 60 мм; *б* – межполюсный зазор 80 мм;

1 –  $\rho_{\text{ФМЖ}}=850 \text{ кг/м}^3$ ; 2 –  $\rho_{\text{ФМЖ}}=1000 \text{ кг/м}^3$ ; 3 –  $\rho_{\text{ФМЖ}}=1150 \text{ кг/м}^3$

При увеличении силы тока от 0 до 15 А, подаваемого в электромагнитную систему сепаратора ФГС-1, что эквивалентно увеличению  $H_{\text{grad}H}$ , эффективная плотность ФМЖ возрастает. При снижении межполюсного зазора с 80 до 60 мм, что также эквивалентно увеличению  $H_{\text{grad}H}$ , эффективная плотность ФМЖ возрастает.

Наибольшая эффективная плотность ФМЖ соответствует ферромагнитной жидкости с большей плотностью (с большей концентрацией магнетита и магнитной восприимчивостью).

### **Вязкость и устойчивость ферромагнитной жидкости. Влияние температуры на свойства жидкости**

Вязкость жидкости – способность соседних слоев жидкости оказывать сопротивление их относительному перемещению. Вязкость прямо не влияет на возможность разделения частиц в ФМЖ, но от неё зависят такие важнейшие параметры обогащения, как глубина обогащения материала по крупности, так и скорость движения разделяемых частиц в ФМЖ, что определяет производительность аппарата.

При повышении вязкости ФМЖ разделяемые частицы будут медленнее "всплывать" и "тонуть", снижая производительность аппарата, вплоть до полного прекращения их движения. В этом случае разделяемые частицы не в состоянии раздвинуть соседние слои ФМЖ для продолжения движения. По этой же причине увеличение вязкости ФМЖ приводит к росту размера частиц, обогащаемых ФГС-способом (эффективность обогащения мелких частиц снизится). Поэтому всегда лучше использовать жидкость с меньшей вязкостью при условии, что её магнитная восприимчивость будет достаточной для создания требуемой эффективной плотности для обеспечения эффективного разделения частиц.

Результаты определения вязкости ФМЖ (керосин-магнетит) представлены на рис. 2.18 [5]. Вязкость ФМЖ при увеличении вязкости керосина повышается. Увеличение плотности ФМЖ, связанное с повышением концентрации ферромагнетика в керосине, приводит к возрастанию ее вязкости. В целом вязкость ФМЖ равняется  $(1,8-4,0) \cdot 10^{-3}$  Па·с.

Вязкость парамагнитных жидкостей (см. табл. 2.7) значительно выше, чем вязкость ФМЖ. Это свидетельствует о том, что при использовании ФМЖ можно обогащать более тонкий исходный продукт (особенно это актуально при обогащении тонкого золота и платины) по сравнению с использованием парамагнитной жидкости при той же магнитной системе сепаратора. Это также является одним из факторов, предопределяющих использование в промышленности в основном ферромагнитных жидкостей и ФГС-сепараторов.

Эффективная вязкость ферромагнитной жидкости в магнитном поле  $\mu_{\text{эф}}$  выше её физической вязкости  $\mu_{\text{ж}}$ . На рис. 2.19 приведены зависимости эффективной вязкости ФМЖ от напряжённости внешнего магнитного поля при вязкости керосина  $1,75 \cdot 10^{-3}$  Па·с [5].

При увеличении напряженности магнитного поля до 160 кА/м эффективная вязкость ФМЖ повышается. Дальнейший рост напряженности магнитного поля не приводит к значительному повышению эффективной вязкости ФМЖ.

Устойчивость ФМЖ – сохранение ее магнитных свойств в гравитационных и магнитных полях. Устойчивая ФМЖ имеет постоянную плотность, что определяет высокую точность разделения продуктов. Ферромагнитная жидкость в магнитном поле обладает стабильностью таких показателей, как эффективная плотность в магнитном поле, намагниченность и магнитная восприимчивость [5].

На свойства ФМЖ влияет ее температура. При применении электромагнитной системы обмотки возбуждения нагреваются, что может приводить к повышению температуры жидкости в межполюсном пространстве. Кроме этого, на температуру ФМЖ могут оказывать влияние колебания температуры окружающей среды.

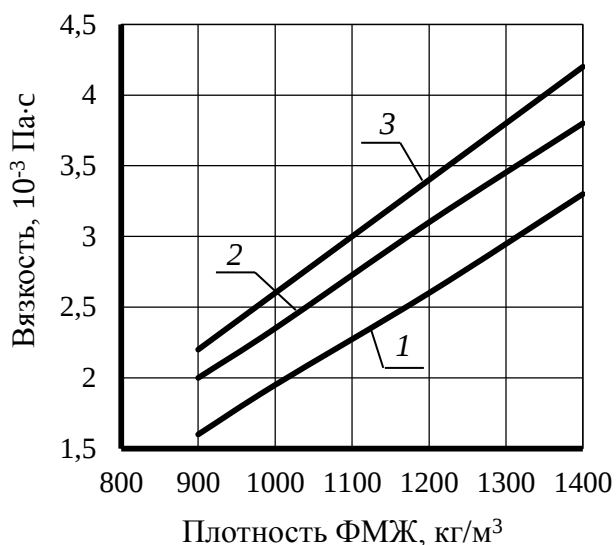


Рис. 2.18. Зависимость вязкости ФМЖ от её плотности при вязкости керосина: 1 –  $1,75 \cdot 10^{-3}$  Па·с; 2 –  $2 \cdot 10^{-3}$  Па·с; 3 –  $2,25 \cdot 10^{-3}$  Па·с

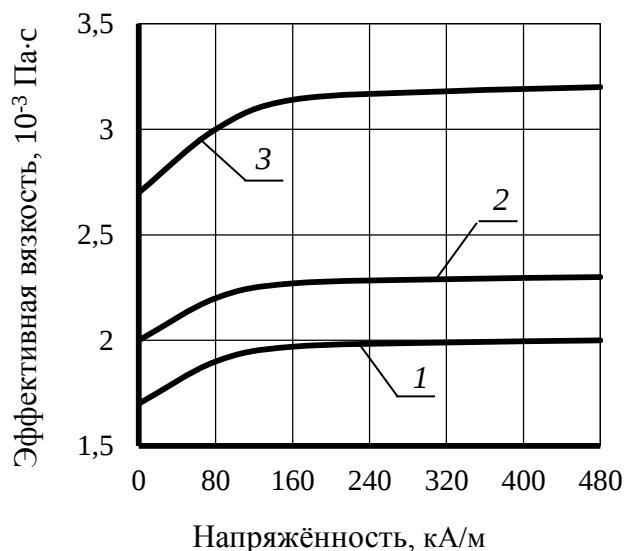


Рис. 2.19. Зависимость эффективной вязкости ФМЖ от напряжённости внешнего магнитного поля при плотности ФМЖ: 1 – 860  $\text{кг/м}^3$ ; 2 – 885  $\text{кг/м}^3$ ; 3 – 920  $\text{кг/м}^3$

Изменение температуры ФМЖ оказывает влияние на её эффективную плотность, что при значительных колебаниях может вызвать ощутимую погрешность разделения. Рост температуры ФМЖ снижает её физическую плотность, что проявляется в увеличении занимаемого ею объема. При увеличении объема снижается концентрация дисперсной фазы (магнетита) в ФМЖ. Это приводит к снижению магнитной восприимчивости ФМЖ и её эффективной плотности, например, для ферромагнитной жидкости с  $\rho_{\text{ж}} = 960 \text{ кг/м}^3$  повышение температуры от 20 до 50  $^{\circ}\text{C}$  уменьшает значение эффективной плотности на 520  $\text{кг/м}^3$ . С уменьшением концентрации магнетита в ФМЖ (со снижением плотности) влияние температуры становится меньше.

При повышении температуры объемная магнитная восприимчивость ФМЖ уменьшается. Изменение температуры на 15  $^{\circ}\text{C}$  в полях с напряженностью от 120 до 320 кА/м приводит к уменьшению магнитной восприимчивости на 15 %, а с напряжённостью 480 кА/м - на 7-10 % [5].

Вязкость ФМЖ также зависит от температуры, при снижении последней ниже 20 °С вязкость резко возрастает.

Поэтому температуру ФМЖ необходимо контролировать. У сепараторов с электромагнитной системой может быть предусмотрена система охлаждения ферромагнитной жидкости. Феррогидростатические сепараторы с системой из постоянных магнитов более предпочтительны с точки зрения постоянства температуры ФМЖ, по сравнению с сепараторами с электромагнитной системой.

### **Магнитные поля феррогидростатических сепараторов**

Отличительной особенностью ФГС-сепараторов является наличие разделительной среды (ФМЖ), расположенной в межполюсном зазоре сепаратора. Изменения магнитной выталкивающей силы в межполюсном пространстве определяются профилем полюсных наконечников.

В ФГС-сепараторах магнитное поле создается полюсными наконечниками с клиновидным или гиперболическим профилем (см. рис. 1.1, *д*). Для обогащения материалов с близкими плотностями необходимо применять полюсные наконечники с гиперболическим профилем. Также дополнительно устанавливают третий нейтральный полюс (из магнитномягкой стали). Это позволяет создать изодинамическое магнитное поле, для которого  $H \text{grad} H = \text{const}$ . При этом по высоте зоны разделения создается относительно постоянная эффективная плотность ФМЖ.

Разделение смесей с большой разницей в плотностях частиц можно с достаточной эффективностью проводить в аппаратах с клиновидными полюсными наконечниками. Магнитная выталкивающая сила при этом возрастает по мере уменьшения межполюсного зазора сверху вниз (рис. 2.20).

Для расчёта магнитных полей феррогидростатических сепараторов разработан ряд методик, позволяющих рассчитать форму полюсов сепаратора, создающих изодинамическое поле для обеспечения постоянной кажущейся плотности ФМЖ в межполюсном зазоре сепаратора (например, приведённые в работах [5, 21, 25]).

Однако выполненные экспериментальные исследования по определению распределения напряжённости магнитного поля и эффективной плотности ФМЖ в рабочем зазоре сепаратора ФГС-70 с полюсами гиперболического профиля показали, что значения напряжённости,  $\text{grad} H$ , и эффективной плотности ФМЖ непостоянны и изменяются как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях [5, 26]. Поэтому при разработке магнитных систем сепараторов

стремятся достичь меньшего изменения  $H \text{grad} H$  в рабочей зоне как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях.

Учитывая сложности создания изодинамического поля, обеспечивающего постоянную эффективную плотность ФМЖ в рабочем зазоре сепаратора, в настоящее время ФГС-сепараторы используются в основном для разделения смесей с большой разницей в плотностях частиц. Для этой цели (например, для обогащения золота) используют относительно простые ФГС-сепараторы с клиновидными полюсами из постоянных магнитов. При этом разница в плотностях разделяемых частиц должна быть выше колебаний эффективной плотности ФМЖ в рабочей зоне сепаратора.

### Движение частиц в феррогидростатических сепараторах

Движение частиц зернистого материала при ФГС-обогащении происходит под действием следующих основных сил: выталкивающей магнитной силы, силы тяжести, силы Архимеда и силы сопротивления среды.

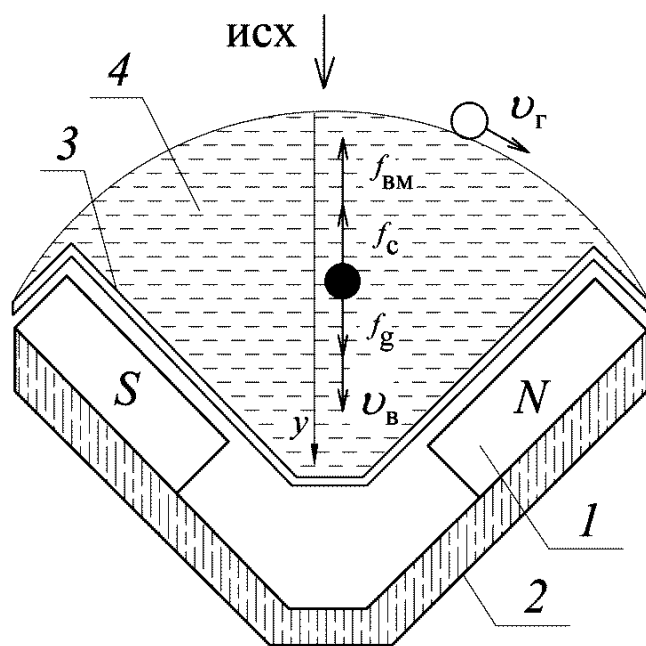


Рис. 2.20. Схема сил, действующих на частицы в ФГС-сепараторе:  
1 – полюсы магнитной системы; 2 – магнитопровод; 3 – кювета; 4 – ферромагнитная жидкость

Рассмотрим движение «тяжёлой» частицы, опускающейся на дно кюветы сепаратора, заполненной ферромагнитной жидкостью (рис. 2.20). Направление оси ординат – сверху вниз.

Удельная магнитная восприимчивость частицы  $\chi_{\text{ч}} < \chi_{\text{ФМЖ}}$  и  $\chi_{\text{ч}} \rightarrow 0$ , поэтому магнитная выталкивающая сила будет стремиться вытолкнуть частицу вверх на поверхность ФМЖ. Удельная магнитная выталкивающая сила рассчитывается по уравнению (2.74).

Частица будет двигаться вниз под действием силы тяжести, уменьшенной на величину силы Архимеда.

Удельная сила тяжести, уменьшенная на величину силы Архимеда:

$$f_g = g \frac{\rho - \rho_{\text{ФМЖ}}}{\rho}. \quad (2.78)$$

При движении частицы вниз на неё будет действовать сила сопротивления среды (ФМЖ). Для частиц крупностью 2 мм эта сила определяется по закону Риттингера. Удельная сила

$$f_c = \frac{3}{8} \cdot \frac{\rho_{\text{ФМЖ}} v_b^2}{\rho d}, \quad (2.79)$$

где  $v_b$  - вертикальная скорость частицы, м/с.

Уравнение движения частицы, опускающейся на дно ванны сепаратора, запишется следующим образом:

$$dv_b/dt = f_g - f_{\text{вм}} - f_c. \quad (2.80)$$

Отсюда следует, что частица погрузится на дно кюветы сепаратора при выполнении соотношения:

$$f_g \geq f_{\text{вм}} + f_c. \quad (2.81)$$

Если соотношение (2.81) не выполняется, то частица останется на поверхности ФМЖ.

У магнитных систем с клиновидными полюсами магнитная выталкивающая сила возрастает при движении частицы вниз. По мере погружения частицы будет возрастать эффективная плотность ФМЖ, и частица может остановиться, не достигнув дна кюветы сепаратора. Поэтому для оценки возможности достижения дна «тяжёлой» частицей необходимо иметь зависимость увеличения напряжённости магнитного поля по высоте рабочей зоны сепаратора сверху вниз.

Если разделение происходит в сепараторе с магнитным полем, приближающимся к изодинамическому, то можно допустить, что магнитная выталкивающая сила по высоте рабочей зоны постоянная. В этом случае, учитывая соотношения (2.72), (2.73) и при известной эффективной плотности ФМЖ, уравнение движения частицы, опускающейся на дно ванны сепаратора, запишется следующим образом:

$$\frac{dv_b}{dt} = g \frac{\rho - \rho_{\text{эф}}}{\rho} - \frac{3}{8} \cdot \frac{\rho_{\text{ФМЖ}} v_b^2}{\rho d}. \quad (2.82)$$

В этом случае, если частица начала движение вниз, то она в любом случае достигнет дна кюветы сепаратора.

### Пример

Рассчитать максимально возможную эффективную плотность ФМЖ, достигаемую с помощью магнитной системы с клиновидными полюсами из постоянных магнитов (см. рис. 2.20) в нормальном к поверхности полюсов направлении на уровне минимального межполюсного зазора (зазор 12 мм, нижняя часть полюсов) и на уровне центра полюсов (межполюсный зазор 23 мм, середина полюсов по высоте).

### Исходные данные

Напряжённость магнитного поля на поверхности полюсов при отсутствии в рабочем зазоре ФМЖ (воздушная среда):  $H_0=424$  и  $352$  кА/м, соответственно при зазоре 12 и 23 мм. Коэффициент неоднородности магнитного поля:  $c=0,045$  и  $0,04$  мм, соответственно при зазоре 12 и 23 мм.

Удельная магнитная восприимчивость частицы и ФМЖ:  $\chi_{\text{ч}} \rightarrow 0$ ;  $\chi_{\text{ФМЖ}}=0,2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг. Магнитная проницаемость ФМЖ (относительная):  $\mu_{\text{ФМЖ}}=1,02$ . Плотность ФМЖ:  $\rho_{\text{ФМЖ}}=1000$  кг/м<sup>3</sup>. Размер частицы:  $d=2$  мм.

Расстояние от поверхности полюса в нормальном направлении до ближнего к поверхности полюса края частицы принять:  $\Delta=1$ ; 3; 5 мм (межполюсный зазор 12 мм) и  $\Delta=1$ ; 5; 10,5 мм (межполюсный зазор 23 мм). В рассматриваемом примере величина  $\Delta=1$  мм соответствует толщине стенки кюветы сепаратора (см. рис. 2.20).

### Решение

При расчётах значения всех величин использовать в системе СИ.

Выполним расчёт при межполюсном зазоре 12 мм и расстоянии от поверхности полюса в нормальном направлении до ближнего к поверхности края частицы при  $\Delta=1$  мм. По формуле (2.74) рассчитываем значение удельной выталкивающей магнитной силы:  $f_{\text{вм}}=173,6$  Н/кг. По формуле (2.73) рассчитываем значение эффективной плотности ФМЖ:  $\rho_{\text{эф}}=18,7$  кг/м<sup>3</sup>. Полученное значение следует считать теоретическим максимально возможным значением эффективной плотности ФМЖ для рассматриваемых условий.

Для других значений межполюсного зазора и расстояния от поверхности полюса в нормальном направлении до ближнего к поверхности края частицы эффективная плотность ФМЖ рассчитывается аналогично. Результаты расчётов сведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Результаты расчёта эффективной плотности ФМЖ

| Межполюсный зазор                                    | Расстояние по нормали от полюса, мм | Удельная магнитная выталкивающая сила, Н/кг | Эффективная плотность ФМЖ, кг/м <sup>3</sup> |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 12 мм.<br>Нижняя часть полюсов,<br>минимальный зазор | 1                                   | 173,46                                      | 18681,88                                     |
|                                                      | 3                                   | 144,89                                      | 15769,15                                     |
|                                                      | 5                                   | 121,02                                      | 13336,23                                     |
| 23 мм.<br>Центр полюсов (середина полюсов по высоте) | 1                                   | 108,38                                      | 12048,22                                     |
|                                                      | 5                                   | 78,70                                       | 9022,66                                      |
|                                                      | 10,5                                | 50,69                                       | 6166,88                                      |

Результаты расчётов показали, что с увеличением расстояния по нормали от полюса магнитной системы к центру межполюсного зазора эффективная плотность ФМЖ снижается. При этом при увеличении межполюсного зазора эффективная плотность снижается быстрее.

При увеличении межполюсного зазора (снизу вверх, см. рис. 2.20), эффективная плотность ФМЖ снижается.

Рассмотренную конструкцию магнитной системы с клиновидными полюсами можно использовать в сепараторе, предназначенном только для разделения смесей с большой разницей в плотностях частиц, в связи со значительным изменением эффективной плотности ФМЖ как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях.

## **2.7. Физические основы электродинамической сепарации**

Электродинамическая сепарация применяется для разделения немагнитных металлов по электрической проводимости (Al-Cu, Al-Pb, Cu-Pb и др.) или для разделения проводящих немагнитных металлов от непроводящих частиц (неметаллов). При разделении частицы с высокой электрической проводимостью отклоняются из общего потока материала под действием магнитной силы. Электродинамический метод является одним из немногих методов магнитного обогащения, в котором разделение происходит не в постоянном, а в переменном магнитном поле.

Электродинамический метод обогащения основан на взаимодействии магнитного поля и вихревых токов, возникающих в электропроводном веществе под воздействием электродвижущей силы (ЭДС), 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.

При движении электропроводного металла в переменном поле или при действии на неподвижный электропроводный металл переменным или бегущим магнитным полем, в проводнике индуцируется ЭДС, возникают вихревые или наведенные токи (токи Фуко), которые изменяют индукцию магнитного поля, вызывая взаимодействие магнитного поля с проводником.

Вихревые токи, наведенные в частицах электропроводных немагнитных металлов, при изменении пронизывающего их магнитного потока являются индукционными и прямо пропорциональны скорости изменения магнитного потока или частоте бегущего магнитного поля. В отличие от электрического тока в проводах вихревые токи замыкаются непосредственно в проводящей частице проводника, образуя вихреобразные контуры. Эффектом взаимодействия кон-

туров тока с создавшим их магнитным потоком является, в частности, выталкивание немагнитных металлов из поля катушки переменного тока.

Один из наиболее перспективных методов электродинамической сепарации для извлечения из вторичного сырья цветных металлов является сепарация в бегущем магнитном поле, которое, подобно вращающемуся магнитному полю асинхронной машины, может создаваться обмоткой трехфазного тока (линейные асинхронные двигатели) или при относительном перемещении барабана (ленты) и многополюсной магнитной системы с чередующейся полярностью полюсов.

Бегущее магнитное поле создается в какой-либо точке барабанного сепаратора при его вращении относительно разноименных неподвижных полюсов во всех барабанных сепараторах с чередованием полюсов по периметру барабана. Частота бегущего поля составит, Гц:

$$f = \nu / (2S), \quad (2.83)$$

где  $\nu$  – скорость движения ленты или барабана относительно магнитной системы, м/с;  $S$  – шаг полюсов магнитной системы, м.

В практике обогащения железных руд скорость вращения барабанов сепараторов обычно составляет 1-2 м/с, а шаг полюсов системы  $S=0,15-0,2$  м. Частота бегущего магнитного поля при этом мала и составляет всего 2,5-6,7 Гц. При такой низкой частоте вихревые токи будут малы, и взаимодействие электропроводного тела с магнитным полем будет неощутимо. Для электродинамической сепарации необходима более высокая частота бегущего магнитного поля (в 10 раз и более), которую можно создать, согласно уравнению (2.83), увеличив  $\nu$  или уменьшив  $S$ .

Шаг полюсов магнитной системы можно уменьшать до определенного предела. Значительно увеличивать скорость движения барабана относительно неподвижной магнитной системы также нельзя, так как при этом резко возрастают центробежные силы, сбрасывающие частицы с барабана. В электродинамических сепараторах с многополюсными магнитными системами необходимую частоту бегущего магнитного поля создают следующим образом. Барабан сепаратора вращается с обычной скоростью, необходимой для транспортирования частиц в рабочую зону. Вместо барабана может быть лента или наклонная плоскость, по которой самотёком движутся частицы. Внутри барабана (в зоне разделения) с повышенной скоростью вращается магнитная система, обеспечивающая смену полярностей полюсов в соответствии со скоростью вращения  $\nu$ ,

что создает необходимую частоту  $f$  и механически не воздействует на разделяемые частицы (см. рис. 1.1, *e*).

В линейном асинхронном двигателе электромагнитная система с обмоткой трехфазного тока создает синусоидальное бегущее поле при наложении трех синусоидальных однофазных полей, сдвинутых относительно друг друга на угол  $(2/3) \cdot \pi$ . В каждой точке электромагнитной системы трехфазного тока бегущее поле создается за счет смещения фаз обмотки относительно друг друга. Частоту переменного магнитного поля линейных асинхронных двигателей, применяемых в электродинамических сепараторах, определяет частота тока питающей сети.

Рассмотрим взаимодействие наведенного в электропроводной частице вихревого тока с переменным магнитным полем, исходя из классических законов электродинамики.

На сторонах частицы длиной  $l$ , меньшей полюсного шага  $S$ , двигающейся со скоростью  $v$  в магнитном поле, будет индуцироваться ЭДС,  $B$ :

$$\varepsilon = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha, \quad (2.84)$$

где  $B$  – индукция магнитного поля, Тл;  $l$  – длина частицы, м;  $\alpha$  – угол между направлением вектора скорости частицы и вектором индукции магнитного поля.

Формула будет справедлива и для случая, когда частица движется со скоростью  $v_1$  через бегущее магнитное поле, создаваемое вращающейся с линейной скоростью  $v_2$  магнитной системой. Тогда  $v = v_2 - v_1$ . В формуле (2.84) и в следующих формулах в качестве скорости  $v$  будем рассматривать скорость бегущего поля, допустив, что не частица движется в магнитном поле, а магнитное поле перемещается относительно частицы, что и происходит в электродинамических сепараторах в процессе разделения.

Для многополюсной магнитной системы угол  $\alpha = (\pi/S) \cdot v \cdot t$  или  $\alpha = (\pi/S) \cdot x$ , где  $t$  и  $x$  – временная и пространственная координата бегущей волны. Координата  $x$  изменяется от 0 (над серединой полюса) до  $S$  (над серединой полюса противоположной полярности). Используя выражение (2.83), можно записать  $\alpha = 2\pi \cdot f \cdot t = \omega t$ , где  $\omega$  – угловая частота.  $\sin \alpha$  будет изменяться от 0 до 1 в соответствии с частотой бегущего магнитного поля. Над серединой полюса угол  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\sin \alpha = 1$ , в межполюсном пространстве  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\sin \alpha = 0$ .

Сила тока в частице, созданная разностью ЭДС на её сторонах:

$$i = \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}, \quad (2.85)$$

где  $\varepsilon$  и  $\varepsilon'$  – ЭДС на двух сторонах частицы длиной  $l$ , В;  $R$  и  $X_L$  – активное и индуктивное сопротивление частицы, Ом.

Запишем выражение (2.85), подставив вместо ЭДС зависимость (2.84):

$$i = \frac{B \cdot l \cdot v \left[ \sin\left(\frac{\pi}{S}(x+l)\right) - \sin\left(\frac{\pi}{S}x\right) \right]}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}. \quad (2.86)$$

Максимальное значение силы вихревого тока, наведенного в частице длиной  $l$ , а следовательно, и силу его взаимодействия с магнитным полем, согласно уравнению (2.86), во многом определяет длина частицы. Наиболее эффективно процесс электродинамической сепарации протекает для частиц, размер которых больше  $1/2$  шага полюсов. По некоторым источникам [74] при длине частицы менее  $1/4$  шага полюсов эффективность разделения резко снижается в связи с низким значением вихревого тока, наведенного в частице. В зависимости от положения частицы в межполюсном зазоре (изменения координат частицы вдоль её длины  $x$  и  $x+l$ ) значение силы вихревого тока будет изменяться в зависимости от разницы  $\sin((x+l)\pi/S) - \sin(x\pi/S)$ .

Силу взаимодействия магнитного поля с вихревыми токами, наведенными в частице, можно определить как силу Ампера, действующую на крайние стороны частицы:

$$F_A = i \cdot B \cdot l \cdot \left[ \sin\left(\frac{\pi}{S}(x+l)\right) - \sin\left(\frac{\pi}{S}x\right) \right]. \quad (2.87)$$

Подставив в формулу (2.87) значение силы тока и заменив  $R$  и  $X_L$  на соответствующие выражения, запишем формулу для силы Ампера следующим образом:

$$F_A = \frac{B^2 \cdot l^2 \cdot v \cdot \left[ \sin\left(\frac{\pi}{S}(x+l)\right) - \sin\left(\frac{\pi}{S}x\right) \right]^2}{\sqrt{(l/(\sigma \cdot S_q))^2 + (2\pi \cdot f \cdot L)^2}}, \quad (2.88)$$

где  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость частицы, См/м;  $S_q$  – площадь сечения частицы, м<sup>2</sup>;  $L$  – индуктивность частицы, Гн;  $2\pi f = \omega$  – угловая частота, Гц.

Индукция магнитного поля при удалении от поверхности магнитной системы снижается. Поэтому при увеличении высоты частицы сила Ампера, действующая на частицу, будет снижаться. Для учёта этого явления в выражение (2.88) величину  $B^2$  необходимо заменить на  $\int B \text{grad} B$ :

$$\int_d c B_0^2 e^{-2cx} dx = \frac{B_0^2 c}{2c} e^{-2cx} \Big|_{\Delta+d}^{\Delta} = \frac{B_0^2}{2} e^{-2c\Delta} (1 - e^{-2cd}), \quad (2.89)$$

где  $\Delta$  – расстояние по нормали между поверхностью магнитной системы и частицей, м;  $d$  – высота частицы, м.

Тогда окончательную формулу для расчёта силы Ампера можно записать следующим образом:

$$F_A = \frac{l^2 \cdot v \cdot B_0^2 \cdot e^{-2c\Delta} (1 - e^{-2cd}) \cdot \left[ \sin\left(\frac{\pi}{S}(x+l)\right) - \sin\left(\frac{\pi}{S}x\right) \right]^2}{2 \cdot \sqrt{(l/(\sigma \cdot S_q))^2 + (2\pi \cdot f \cdot L)^2}}. \quad (2.90)$$

Удельная сила Ампера (отнесённая к единице массы частицы):

$$f_A = \frac{l^2 \cdot v \cdot B_0^2 \cdot e^{-2c\Delta} (1 - e^{-2cd}) \cdot \left[ \sin\left(\frac{\pi}{S}(x+l)\right) - \sin\left(\frac{\pi}{S}x\right) \right]^2}{V \cdot \rho \cdot 2 \cdot \sqrt{(l/(\sigma \cdot S_q))^2 + (2\pi \cdot f \cdot L)^2}}. \quad (2.91)$$

Под воздействием силы  $F_A$  электропроводные частицы отклоняются из общего потока материала в направлении чередования полюсов переменного магнитного поля. Сила  $F_A$  изменяется по синусоидальному закону с частотой  $f$  и по экспоненциальному закону, связанному с шагом полюсов  $S$ , и на неё сильно влияет форма разделяемых частиц. Поэтому, например, для барабанного сепаратора с вращающейся магнитной системой довольно сложно рассчитать точку отрыва частицы от барабана и траекторию движения частицы после отрыва с целью оптимизации параметров аппарата для заданных свойств разделяемого сырья. Также сложно рассчитать траекторию движения частицы через рабочую зону сепараторов с плоской магнитной системой.

Для расчёта силы  $F_A$ , действующей на электропроводные частицы в электродинамических сепараторах, предложены другие выражения, принятые с определенными допущениями, например [74]:

$$F_A \cong m \cdot B^2 \cdot v \cdot (l/S)^2 \cdot (\sigma/\rho)^2. \quad (2.92)$$

Проанализируем влияние факторов зависимостей (2.90)-(2.92) на силу  $F_A$  с точки зрения выбора электродинамического сепаратора. Чем выше будет эта сила, тем эффективнее будет процесс разделения в электродинамическом сепараторе.

Рассмотрим параметры электродинамического сепаратора. Индукция магнитного поля однозначно влияет на силу  $F_A$ , увеличивая ее. Эта величина зависит от конструкции магнитной системы, а для систем из постоянных магнитов – от вида постоянных магнитов. Феррит-бариевые магниты, используемые для создания магнитных систем в практике железных руд, позволяют достичь индукции на поверхности барабана не более 0,16-0,2 Тл. Если применить магниты из редкоземельных композиций, например  $Nd_2Fe_{14}B$  и др., то можно получить индукцию 0,4-0,5 Тл. Поэтому в настоящее время магнитные системы электродинамических сепараторов в основном изготавливают из редкоземельных постоянных магнитов.

Другой характеристикой магнитной системы является шаг полюсов. Чем меньше шаг полюсов, тем большую частоту и скорость бегущего магнитного поля можно создать, увеличив силу  $F_A$ . Но, с другой стороны, уменьшение шага полюсов может привести к снижению индукции магнитного поля, действующего на частицу. Поэтому уменьшать  $S$  следует до тех пор, пока снижение составляющей магнитной силы  $(e^{-2\pi\Delta/S} - e^{-2\pi(\Delta+d)/S})$  будет компенсироваться увеличением скорости и частоты бегущего магнитного поля и не приведет к снижению силы взаимодействия поля с частицей.

Увеличение частоты бегущего магнитного поля приводит к увеличению силы  $F_A$ . Для барабанных электродинамических сепараторов с вращающейся магнитной системой из постоянных магнитов частоту бегущего магнитного поля увеличивают путём повышения линейной скорости вращения барабана, для сепараторов с электромагнитными системами – путём увеличения частоты тока, питающего электромагнит.

На магнитную силу, а следовательно, и на силу  $F_A$  будет влиять расстояние по нормали между поверхностью магнитной системы и частицей  $\Delta$ . Эта величина должна быть минимальной исходя из технических возможностей. Величина  $\Delta$  связана с наличием транспортной поверхности для частиц, движущихся над индуктором бегущего магнитного поля.

Таким образом, параметры электродинамического сепаратора, влияющие на процесс разделения, следующие: индукция магнитного поля, градиент поля (показатели  $S$  и  $\Delta$ ) и частота бегущего магнитного поля.

Рассмотрим свойства разделяемых частиц, значимо влияющие на процесс разделения. Основным свойством, по которому осуществляется разделение, является электрическая проводимость частиц, значения которой для различных металлов приведены в табл. 2.6. В работе [74] металлы расклассифицированы по параметру  $\sigma/\rho$ , который характеризует способность металла подвергаться электродинамической сепарации: чем выше отношение, тем легче, при прочих равных условиях, извлекается металл при электродинамической сепарации (табл. 2.11).

Таблица 2.11

Параметр  $\sigma/\rho$  для различных металлов

| Металл   | $\sigma/\rho, 10^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{См/кг}$ | Металл  | $\sigma/\rho, 10^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{См/кг}$ |
|----------|---------------------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------|
| Алюминий | 132                                                     | Золото  | 23                                                      |
| Магний   | 130                                                     | Латунь  | 18                                                      |
| Медь     | 64                                                      | Олово   | 12                                                      |
| Серебро  | 59                                                      | Платина | 4,7                                                     |
| Цинк     | 24                                                      | Свинец  | 4                                                       |

Согласно формулам (2.91) и (2.92), чем выше величина параметра  $\sigma/\rho$ , тем большая удельная сила Ампера будет действовать на частицу. Поэтому плотность металла, наравне с электрической проводимостью, следует рассматривать в качестве физического свойства, обеспечивающего разделение при электродинамической сепарации.

Среди металлов, которые распространены во вторичном сырье и имеют крупность, достаточную для электродинамического разделения, можно выделить Cu и Al, имеющие высокие значения электрической проводимости и показателя  $\sigma/\rho$ . Эти металлы выталкиваются бегущим магнитным полем при сепарации, а на неметаллы или на металлы с низким значением  $\sigma/\rho$  (например, свинец) поле не действует или действует в недостаточной степени. Из практики электродинамического обогащения высокая эффективность разделения может быть достигнута для систем алюминий-свинец, медь-свинец, металл-неметалл.

Геометрические размеры частиц существенно влияют на процесс разделения: чем больше длина частицы (чем выше отношение длины частицы к шагу полюсов) и меньше ее высота (исходя из экспоненциального уменьшения магнитной силы), тем сильнее на нее действует сила Ампера. Следовательно, эффективность выделения плоских продолговатых частиц из исходного продукта при электродинамической сепарации будет выше, чем для частиц другой формы.

На рис. 2.21 приведена зависимость максимального значения параметра  $\sin((x+l)\pi/S) - \sin(x\pi/S)$ , входящего в формулу (2.91), в зависимости от отношения длины частицы к шагу полюсов.

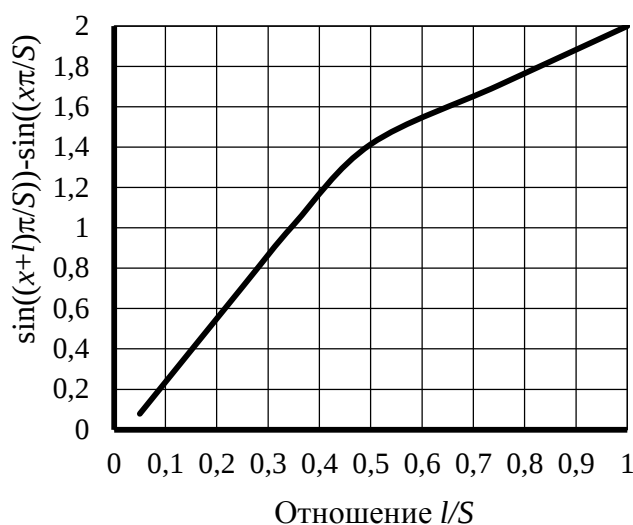


Рис. 2.21. Зависимость максимального значения разницы  $\sin((x+l)\pi/S) - \sin(x\pi/S)$  от отношения  $l/S$

При уменьшении величины  $l/S$  разница синусов, а следовательно, и сила Ампера снижается.

Индуктивное сопротивление частицы зависит от частоты поля и от индуктивности частицы. Индуктивность электропроводных частиц зависит от их формы и при прочих равных условиях больше для прямоугольных частиц кругового сечения (длина частицы больше диаметра) по сравнению с прямоугольными частицами прямоугольного сечения.

Для расчета индуктивности частицы необходимо знать глубину проникновения в нее вихревых токов:

$$\delta = \sqrt{25,3 \cdot 10^4 \cdot l / (f \cdot \sigma \cdot S_{\text{ч}})}. \quad (2.93)$$

Если  $\delta$  больше высоты частицы, то имеет место низкая частота, если наоборот – то высокая. Формулы для расчета индуктивностей частиц, в зависимости от их формы и глубины проникновения вихревых токов, приведены в специальной литературе. Ниже для примера приведены формулы для расчета индуктивности прямоугольных частиц кругового и прямоугольного сечений, соответственно, для низкой частоты:

$$L = (\mu_0 \cdot l / 2\pi) \cdot [\ln(2 \cdot l / r) - 3/4 + 28 \cdot r / 4\pi l - r^2 / 4l^2]; \quad (2.94)$$

$$L = (\mu_0 \cdot l / 2\pi) \cdot [\ln(2 \cdot l / (b+d)) + 1/2], \quad (2.95)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $l$  – длина частицы, м;  $r$  – радиус частицы, м;  $b$  и  $d$  – стороны прямоугольного сечения (ширина и высота) частицы, м.

Чем выше индуктивное сопротивление частицы, тем ниже сила взаимодействия частицы с магнитным полем. Расчет относительной силы взаимодействия бегущего магнитного поля с электропроводной частицей показал, что си-

ла выше для частиц прямоугольного сечения. Далее, по убыванию силы, идут частицы квадратного, эллиптического и кругового сечений (длина больше линейных размеров сечения частицы). Если частица полая, то это также снижает силу взаимодействия.

Кроме свойств разделяемых частиц и параметров сепаратора на эффективность разделения существенное влияние оказывает ориентация частиц. В процессе электродинамической сепарации эффективность разделения снижается из-за произвольной ориентации частиц продолговатой формы, вследствие чего некоторые электропроводные частицы в момент входа в рабочую зону сепарации оказываются развернутыми поперек магнитных силовых линий. Вихревые токи в таких частицах значительно ниже, чем в частицах, развернутых вдоль чередования полюсов. В результате предварительной ориентации электропроводных частиц вдоль магнитных силовых линий эффективность сепарации значительно повышается.

Предварительная ориентация частиц продолговатой формы имеет большое значение при разделении на барабанном электродинамическом сепараторе с вращающейся магнитной системой (см. рис. 1.1, е). При ориентации частицы продолговатой формы вдоль чередования полюсов (вдоль бегущего магнитного поля) сила Ампера будет направлена вдоль длины частицы и частица получит максимальное ускорение. При ориентации частиц продолговатой формы поперёк чередования полюсов частица кругового сечения начнёт вращаться в направлении, противоположном направлению вращения магнитной системы, совершать движения вдоль и поперёк чередования полюсов и, в конечном счёте, также отклонится от барабана, но при большем угле его поворота и получит меньшее ускорение. Это приведёт к меньшему изменению её дальнейшей траектории движения и снизит эффективность разделения. Чем выше отношение длины частицы к шагу полюсов вращающейся магнитной системы, тем большее значение приобретает предварительная ориентация частиц.

В барабанных сепараторах с вращающейся магнитной системой предварительная ориентация частиц может быть достигнута с помощью использования транспортирующей или наклонной поверхности с направляющими, ориентирующими частицы вдоль магнитных силовых линий.

На рис. 2.22 и 2.23 приведены зависимости, характеризующие влияние отдельных факторов на процесс электродинамической сепарации. Зависимости получены на барабанном сепараторе с вращающейся магнитной системой из

постоянных редкоземельных магнитов из Nd-Fe-B, шаг полюсов  $S=30$  мм [51, 53]. Принципиальная конструкция сепаратора приведена на рис. 1.1, *е*.

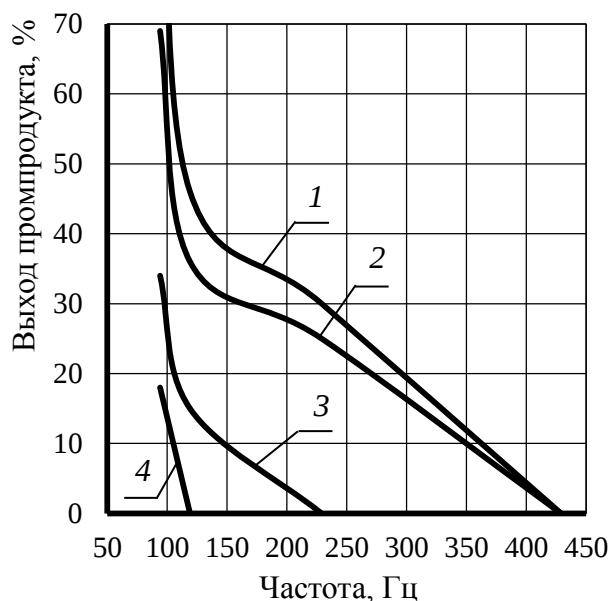


Рис. 2.22. Зависимость выхода промпродукта от частоты бегущего магнитного поля:

1, 2 – неориентированное движение частиц;  
3, 4 – ориентированное движение частиц;  
2, 3 –  $l=20$  мм; 1, 4 –  $l=40$  мм

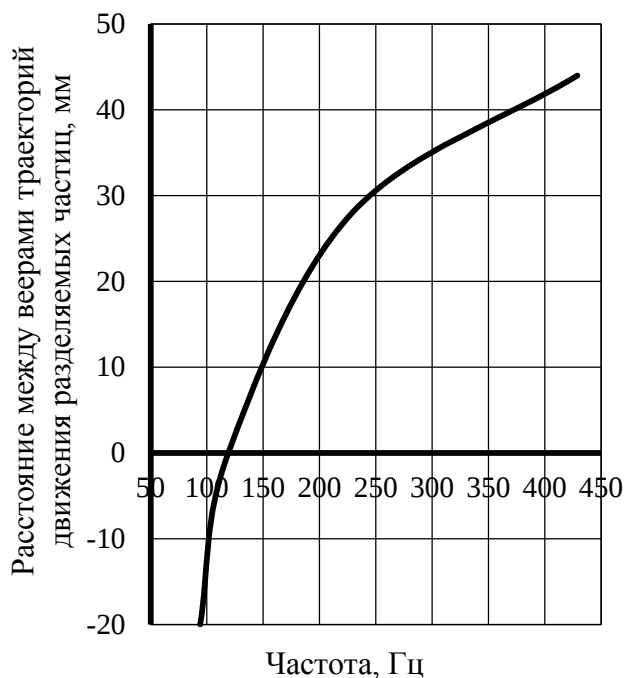


Рис. 2.23. Зависимость расстояния между траекториями движения частиц от частоты бегущего магнитного поля

На рис. 2.22 приведена зависимость выхода промпродукта от частоты бегущего магнитного поля при разделении частиц Cu (проволока, диаметр 4 мм) и ПВХ-изоляции (трубка) длиной 20 и 40 мм без предварительной ориентации и с предварительной ориентацией. При электродинамической сепарации исходный материал разделялся на три продукта: концентрат (массовая доля меди 100 %); промпродукт (смесь Cu и ПВХ-изоляции); хвосты (массовая доля ПВХ-изоляции 100 %). Выход промпродукта принят в качестве критерия эффективности разделения. При выходе промпродукта 0 % эффективность разделения равна 100 %, при выходе промпродукта 100 % эффективность разделения равна нулю (разделение не произошло).

Эффективность процесса возрастает с увеличением частоты бегущего магнитного поля. При движении частиц в зоне разделения электродинамического сепаратора вдоль магнитных силовых линий эффективность процесса заметно выше по сравнению с неориентированным движением частиц. Эффективность, равная 100 %, достигается при неориентированном движении при ча-

стоте 429 Гц, а при движении частиц вдоль магнитных силовых линий – при частотах 119 ( $l=40$  мм) и 229 Гц ( $l=20$  мм).

Длина разделяемых частиц также оказывает влияние на процесс разделения. Так, при движении частиц вдоль магнитных силовых линий большая эффективность процесса соответствует длине частиц 40 мм по сравнению с длиной 20 мм, а при неориентированном движении – наоборот, более короткие частицы разделяются лучше, чем длинные.

На рис. 2.23 приведена зависимость, показывающая повышение эффективности процесса разделения Cu ( $l=20-40$  мм, диаметр 4 мм) и Pb (плоская неправильная форма) частиц при увеличении частоты поля  $f$ , что проявляется в увеличении расстояния между вершинами траектории движения разделяемых частиц (при отрицательном расстоянии траектории пересекаются).

К механическим силам, влияющим на процесс электродинамического разделения, относятся силы тяжести и центробежная сила (при движении частиц по криволинейной поверхности).

В аппаратах, где частицы движутся по криволинейной поверхности над вращающейся магнитной системой, важно знать угол отрыва разделяемых частиц от криволинейной поверхности, необходимый для расчета траекторий их движения и нахождения вероятности попадания частицы в тот или иной продукт. Угол отрыва частицы находится из баланса сил аналогично его нахождению при движении частиц по барабану магнитного сепаратора с верхней подачей.

### **Пример**

Разделение электропроводных частиц (Al, Cu, Pb) осуществляется на барабанном электродинамическом сепараторе с вращающейся магнитной системой (рис. 2.24).

Частицы Al и Cu имеют длину 14 мм, круговое сечение с диаметром 4 мм. Частицы Pb имеют размеры: длина – 10 мм, высота – 2 мм, ширина – 6 мм. Плотность частиц Al, Cu и Pb составляет соответственно: 2700, 8930 и 11350 кг/м<sup>3</sup>. Удельная электрическая проводимость частиц Al, Cu и Pb равна 35,7; 57,1; 4,5 МСм/м. Угол трения для всех частиц принят равным 27°.

Индукция магнитного поля на поверхности магнитной системы  $B_0=0,35$  Тл. Шаг полюсов  $S=0,04$  м. Коэффициент неоднородности магнитного поля  $c=78,5$  м<sup>-1</sup>. Расстояние от поверхности полюсов до рабочей поверхности ленты  $\Delta=0,004$  м.

Радиус индуктора (магнитной системы) 0,15 м. Линейная скорость вращения индуктора 6 м/с. Линейная скорость вращения барабана (скорость частицы) 0,5 м/с.

Рассчитать удельную силу Ампера, действующую на частицы и углы отрыва частиц от барабана. При расчётах принять, что частицы ориентированы длинной стороной вдоль чередования полюсов магнитной системы, один край частицы находится над центром полюса.

## Решение

По формуле (2.83) рассчитываем частоту переменного магнитного поля:  $f=75$  Гц. Скорость перемещения магнитного поля относительно частицы:  $v = 6-0,5=5,5$  м/с.

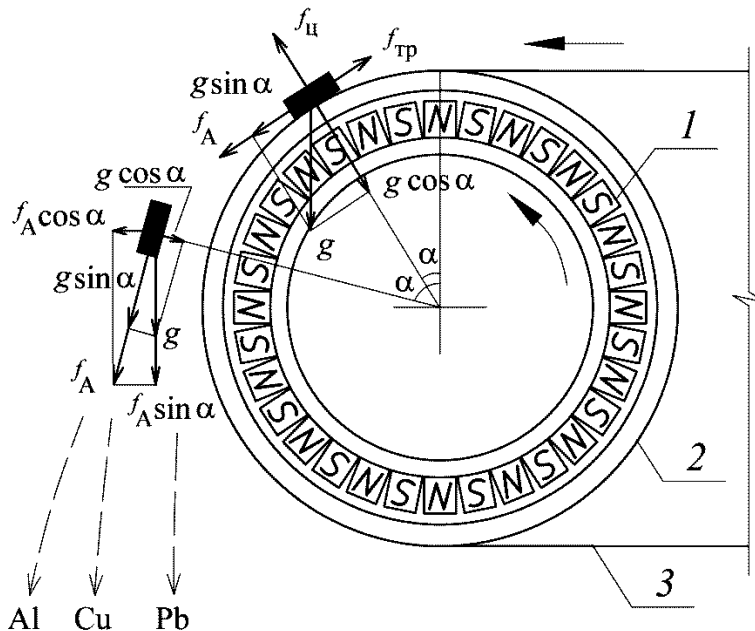


Рис. 2.24. Схема сил, действующих на частицы в электродинамическом сепараторе:  
1 – магнитная система; 2 – барабан; 3 – лента

Выполненные расчёты подтвердили, что при прочих равных условиях удельная сила Ампера зависит от физических свойств частицы, а именно от параметра  $\sigma/\rho$ . В большей степени сила Ампера будет действовать на частицы Al, в меньшей степени сила Ампера будет действовать на частицы Pb. Параметры и режимы работы рассматриваемого сепаратора не позволили достичь удельной силы Ампера, превышающей удельную силу тяжести (для частиц с заданными размерами и физическими свойствами).

Для расчёта углов отрыва частиц от барабана сепаратора, необходимо составить баланс сил, действующих на частицу (см. рис. 2.22). Рассмотрим движение единичной частицы без контакта с другими частицами. Тогда, чтобы частица не смещалась по поверхности барабана, необходимо, чтобы сила трения была больше суммы удельной силы Ампера и тангенциальной составляющей силы тяжести:

$$\operatorname{tg} \varphi \cdot (g \cos \alpha - f_{\text{ц}}) \geq g \sin \alpha + f_A. \quad (2.96)$$

Из уравнения (2.96) выразим угол отрыва частицы от барабана  $\alpha$ :

$$\alpha = \arcsin\left(-\left(f_A + f_{\text{ц}} \operatorname{tg} \varphi\right) \cdot \cos \varphi / g\right) + \varphi. \quad (2.97)$$

Для расчёта угла  $\alpha$  находим по формуле (2.11) удельную центробежную силу:  $f_{\text{ц}}=1,71$  Н/кг (Al и Cu) и  $f_{\text{ц}}=1,69$  Н/кг (Pb).

При расчётах примем, что один край частицы находится над центром полюса ( $x=0$ ). Тогда квадрат разницы синусов из формулы (2.91) будет равен: 0,79 (Al и Cu) и 0,5 (Pb).

Индуктивность частиц Al и Cu рассчитываем по формуле (2.94):  $L=6,17 \cdot 10^{-9}$  Гн, а индуктивность частиц Pb рассчитываем по формуле (2.95):  $L=2,83 \cdot 10^{-9}$  Гн. Активное сопротивление частиц Al, Cu и Pb равно:  $3,12 \cdot 10^{-5}$ ;  $1,95 \cdot 10^{-5}$ ;  $1,85 \cdot 10^{-4}$  Ом. Индуктивное сопротивление частиц равно:  $2,91 \cdot 10^{-6}$  Ом (Al и Cu) и  $1,33 \cdot 10^{-6}$  Ом (Pb).

Удельную силу Ампера рассчитываем по формуле (2.90). Для частиц Al, Cu и Pb она будет равна: 4,70; 1,75; 0,13 Н/кг.

Рассчитываем угол отрыва частиц от барабана:  $-3,4^{\circ}$  (Al);  $13,2^{\circ}$  (Cu) и  $21,8^{\circ}$  (Pb). Отрицательный расчётный угол отрыва частицы Al говорит о том, что частица уже в верхней точке барабана ( $\alpha=0^{\circ}$ ) сразу потеряет контакт с барабаном. Максимальный угол отрыва соответствует частице Pb. Таким образом, согласно расчётам под действием силы Ампера на большее расстояние отклонятся от барабана частицы Al, а на меньшее расстояние отклонятся частицы Pb. Частицы Cu будут двигаться по промежуточной траектории. Это соответствует реальному процессу разделения частиц Al, Cu и Pb в барабанном электродинамическом сепараторе с вращающейся магнитной системой.

### 3. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ

#### 3.1. Магнитная восприимчивость и классификация минералов по магнитным свойствам

Магнитные свойства минералов в основном оцениваются по величине их магнитной восприимчивости.

*Магнитная восприимчивость минерала* – это величина, определяющая степень его взаимодействия с магнитным полем и являющаяся основным признаком разделения при магнитной сепарации.

Принято различать объёмную магнитную восприимчивость (часто слово «объёмная» опускают) и удельную магнитную восприимчивость.

Для сильномагнитных минералов различают магнитную восприимчивость тела и вещества, так как на магнитную восприимчивость ферромагнитного тела влияет его форма. Для этих минералов магнитные восприимчивости тела и вещества не равны. Для слабомагнитных (парамагнитных и диамагнитных) минералов магнитные восприимчивости тела и вещества равны.

*Объёмная магнитная восприимчивость тела* – магнитный момент единицы объёма тела, возникающий при его намагничивании во внешнем магнитном поле с напряжённостью 1 А/м.

Согласно определению, объёмная магнитная восприимчивость тела:

$$\chi_v = M/(V \cdot H), \quad (3.1)$$

где  $M$  – магнитный момент, А·м<sup>2</sup>.

*Намагниченность* – магнитный момент единицы объема тела:

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

где  $J$  – намагниченность тела, А/м.

Учитывая формулы (3.1) и (3.2), можно записать:

$$\alpha_T = J/H. \quad (3.3)$$

Согласно формуле (3.3), объёмная магнитная восприимчивость является безразмерной величиной.

Большее применение для оценки магнитных свойств частиц (минералов) получила удельная магнитная восприимчивость. С помощью этой величины рассчитывается удельная магнитная сила, действующая на частицу, и оценивается возможность её извлечения в магнитный продукт при магнитной сепарации.

*Удельная магнитная восприимчивость тела* – магнитный момент единицы массы вещества при его намагничивании во внешнем магнитном поле с напряженностью 1 А/м.

Согласно определению, удельная магнитная восприимчивость:

$$\chi_T = M/(m \cdot H). \quad (3.4)$$

С учётом равенств (3.1) и (3.4) удельная магнитная восприимчивость равна отношению объёмной восприимчивости на плотность:

$$\chi_T = \alpha/\rho. \quad (3.5)$$

Согласно формуле (3.5), удельная магнитная восприимчивость измеряется в м<sup>3</sup>/кг.

### **Классификация минералов по магнитным свойствам**

Технологическая классификация минералов по магнитным свойствам основана на возможности их извлечения в магнитный продукт при магнитной сепарации. Поэтому в качестве критерия классификации принята величина удельной магнитной восприимчивости минерала. Минералы делятся на три группы: сильномагнитные, слабомагнитные и немагнитные.

#### **1. Сильномагнитные минералы.**

К этой группе относятся минералы с  $\chi > 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/кг. Минералы и вещества представлены ферромагнетиками и ферримагнетиками.

К сильномагнитным минералам относятся: магнетит – Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, титаномagnetит (разновидность магнетита) – Fe(Fe<sup>3+</sup>,Ti)<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, маггемит – γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, моноклинный пирротин – Fe<sub>7</sub>S<sub>8</sub>, ферросилиций (искусственное вещество). Основными рудными минералами железа являются магнетит и титаномagnetит.

Сильномагнитные минералы обогащаются в сепараторах со слабым магнитным полем с индукцией до 0,2-0,3 Тл.

## 2. Слабомагнитные минералы.

К этой группе относятся минералы с  $\chi = 10^{-7} \div 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Минералы и вещества представлены парамагнетиками с  $\chi > 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$  и антиферромагнетиками.

К слабомагнитным минералам относятся оксиды, гидроксиды и карбонаты железа и марганца, ильменит, вольфрамит, гранат, биотит и др.

Граница между сильномагнитными и слабомагнитными минералами достаточно условна. В вышеприведённой классификации она соответствует максимальному значению удельной магнитной восприимчивости среди слабомагнитных минералов, которое имеет минерал ильменит (до  $\chi = 0,95 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$ ). Нижний предел величины удельной магнитной восприимчивости слабомагнитных минералов, которые можно обогащать магнитным методом, снижается с разработкой сепараторов с более сильным магнитным полем.

Удельная магнитная восприимчивость слабомагнитных минералов во много раз меньше, чем у сильномагнитных, поэтому их обогащают в сепараторах с сильным полем с индукцией магнитного поля от 0,3 до 2 Тл.

## 3. Немагнитные минералы.

К этой группе относятся минералы с  $\chi < 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Минералы и вещества представлены парамагнетиками с  $\chi < 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$  и диамагнетиками ( $\chi < 0$ ).

К немагнитным минералам относятся минералы неметаллических полезных ископаемых (кварц, полевой шпат и др.) и минералы, не содержащие Fe, Mn, Ni, Co, за редким исключением (например, пирит  $\text{FeS}_2$ ).

Немагнитные минералы магнитным способом по величине удельной магнитной восприимчивости не обогащаются. Некоторые немагнитные минералы (например, золото) обогащают с помощью феррогидростатической сепарации.

Объёмная и удельная магнитные восприимчивости минералов приведены, в минералогических справочниках [14, 37], учебниках и монографиях [10, 13, 19, 21, 22, 25].

Следует учитывать, что магнитная восприимчивость минералов может изменяться в зависимости от примесей других минералов. Для сильномагнитных минералов магнитная восприимчивость будет зависеть от величины напряженности внешнего магнитного поля, от формы и крупности частицы и от её ориентации в магнитном поле. Поэтому в справочной литературе величина магнитной восприимчивости минерала часто приводится в виде диапазона значений.

### 3.2. Зависимость магнитной восприимчивости сильномагнитных минералов от формы частиц

Магнитные свойства ферромагнитного тела зависят от его формы и от расположения тела относительно вектора напряжённости внешнего магнитного поля.

При помещении ферромагнитного тела во внешнее магнитное поле с напряжённостью  $H$  внутри тела возникает собственное магнитное поле с напряжённостью  $H_p$ , направленное против внешнего магнитного поля. Это поле называется размагничивающим. Напряжённость размагничивающего магнитного поля будет пропорциональна намагниченности вещества:

$$H_p = NJ, \quad (3.6)$$

где  $N$  – коэффициент размагничивания.

Напряжённость магнитного поля внутри ферромагнитного тела  $H_b$  будет меньше напряжённости внешнего магнитного поля  $H$  на величину напряжённости размагничивающего поля тела:

$$H_b = H - H_p = H - NJ. \quad (3.7)$$

Поэтому для ферромагнитных тел различают объёмные магнитные восприимчивости тела и вещества.

Магнитная восприимчивость тела  $\alpha_t$  определяется отношением намагниченности к внешнему полю с напряжённостью  $H$  (см. формулу (3.3)), а магнитная восприимчивость вещества  $\alpha$  определяется отношением намагниченности к внутреннему полю тела с напряжённостью  $H_b$ :

$$\alpha = J / H_b = J / (H - NJ). \quad (3.8)$$

Учитывая равенства (3.3) и (3.8), можно записать:

$$\alpha_t = \alpha / (1 + N\alpha). \quad (3.9)$$

Удельная магнитная восприимчивость тела связана с удельной восприимчивостью вещества  $\chi$  соотношением:

$$\chi_t = \chi / (1 + N\rho\chi). \quad (3.10)$$

Таким образом, для ферромагнитных тел объёмная и удельная магнитные восприимчивости тела меньше, чем объёмная и удельная магнитные восприимчивости вещества, что связано с возникновением в ферромагнитных телах раз-

магнитизирующего поля. Величина намагничивающего поля будет определяться коэффициентом намагничивания  $N$ , зависящим от формы тела.

При увеличении отношения длины тела  $l$  к его высоте  $d$  (диаметру), при расположении длинной оси тела параллельно вектору напряжённости магнитного поля, коэффициент намагничивания снижается. Для бесконечно длинного стержня, ось которого совпадает с направлением вектора напряжённости внешнего магнитного поля, коэффициент  $N=0$ . Для тонкого диска, расположенного перпендикулярно вектору магнитного поля, коэффициент намагничивания равен 1, для шара  $N=0,333$ . Коэффициент намагничивания изменяется от 0 до 1. Для эллипсоидов вращения при расположении длинной полуоси  $l/2$  вдоль вектора напряжённости магнитного поля, а короткой полуоси  $d/2$  – перпендикулярно вектору напряжённости магнитного поля коэффициент намагничивания приведён в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Величина коэффициента намагничивания  $N$

| $l/d$ | 0 (тонкий диск) | 0,5   | 1,0 (шар) | 2     | 5     | 10    | 50     |
|-------|-----------------|-------|-----------|-------|-------|-------|--------|
| $N$   | 1,000           | 0,560 | 0,333     | 0,176 | 0,056 | 0,020 | 0,0015 |

Для частиц магнетита, обычно имеющих продолговатую форму, коэффициент намагничивания в среднем принимают равным 0,16, при условии, что частица магнетита ориентирована длинной стороной вдоль вектора напряжённости магнитного поля. Этот случай характерен для чистых зёрен магнетита.

Если частица представлена сростком магнетита с породным минералом, то внутри сростка зерно магнетита может быть ориентировано длинной стороной поперёк вектора напряжённости магнитного поля. В этом случае коэффициент намагничивания будет больше 0,16.

Следует отметить, что для слабомагнитных и немагнитных минералов (парамагнитных и диамагнитных) минералов коэффициент намагничивания  $N=0$ , поэтому их магнитные восприимчивости тела и вещества будут равны:  $\chi_T = \chi$ .

В установках для экспериментального определения магнитной восприимчивости сильномагнитных минералов создаются условия, при которых влияние формы исследуемых образцов сведено к нулю, когда намагничивающее поле образца  $H_p \rightarrow 0$ . Это достигается, когда образец образует с полюсами электромагнита замкнутую магнитную цепь или когда длинный цилиндр малого сече-

ния ( $N \rightarrow 0$ ), заполненный порошкообразным образцом, помещён в электромагнитный соленоид (катушку). При этом напряжённость внутреннего поля в образце  $H_v$  будет незначительно отличаться от напряжённости внешнего намагничивающего поля, поэтому  $\mathfrak{H}_T \approx \mathfrak{H}$ .

В справочной, учебной и научной литературе [10, 13, 14, 19, 21, 22, 25, 37] приводятся объёмная или удельная магнитная восприимчивость и другие магнитные свойства для сильномагнитного вещества, если особенности формы образца не указаны. При этом слово «вещества» опускают. Поэтому термины «объёмная или удельная магнитная восприимчивость» в дальнейшем по тексту будут означать «объёмная и удельная магнитная восприимчивость вещества конкретного минерала».

Если рассматривается зерно сильномагнитного минерала конкретной формы, то к объёмной или удельной магнитной восприимчивости тела переходят, используя выражения (3.9) и (3.10).

### 3.3. Магнитный гистерезис

Одной из основных особенностей ферромагнитных веществ является зависимость их намагничённости и магнитной индукции от напряжённости внешнего магнитного поля (рис. 3.1). Впервые это явление установил А. Г. Столетов в 1871 г.

На рис. 3.1, а приведена кривая первичного намагничивания и петля гистерезиса ферромагнитного вещества. Если полностью размагничённый ферромагнетик поместить между полюсами электромагнита и увеличивать напряжённость внешнего магнитного поля от 0 до  $+H_{\max}$ , то намагничённость ферромагнетика будет возрастать от 0 до  $J_{\max}$  (кривая  $OA$ ). Величина  $J_{\max}$  называется намагничённостью насыщения и обозначается  $J_s$ , выше которой намагничённость не увеличится. Кривая  $OA$  является первичной кривой намагничивания ферромагнитного тела при увеличении напряжённости поля от 0 до  $+H_{\max}$ .

Если в дальнейшем уменьшить напряжённость магнитного поля от  $+H_{\max}$  до 0, то кривая  $AB$  пройдёт выше первоначальной кривой  $OA$  и намагничённость станет равной  $J_r$  (см. рис. 3.1, а). Это явление называется *магнитным гистерезисом*. Явление гистерезиса заключается в том, что намагничённость и индукция ферромагнетика зависят не только от величины напряжённости намагничивающего поля, но и от его предварительной намагничённости. При одной и той же напряжённости поля намагничённость и магнитная индукция

ферромагнитного вещества могут иметь разные значения, в зависимости от предыдущего магнитного состояния материала.

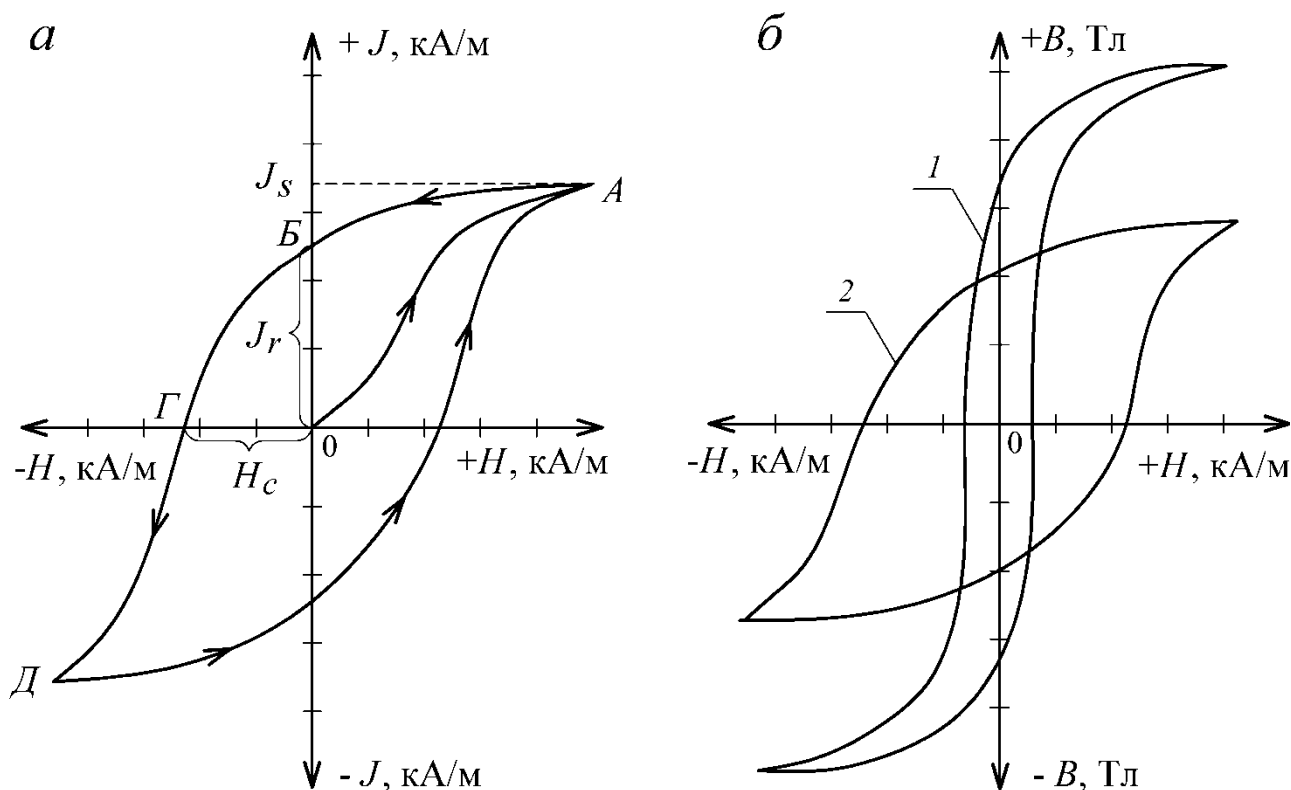


Рис. 3.1. Петли гистерезиса:

*a* – зависимость намагниченности вещества от напряжённости внешнего магнитного поля; *б* – зависимость индукции вещества от напряжённости внешнего магнитного поля: 1 – магнитномягкое вещество; 2 – магнитножесткое вещество

Для уменьшения намагниченности до нуля необходимо создать магнитное поле обратного направления (подать в обмотку электромагнита ток обратного направления) с напряжённостью  $-H_c$  (кривая  $БГ$ ). Если изменять напряжённость магнитного поля сначала от  $-H_c$  до  $-H_{\max}$  (кривая  $ГД$ ), а затем от  $-H_{\max}$  до  $+H_{\max}$  (кривая  $ДА$ ), то получим петлю гистерезиса (см. рис. 3.1, *a*).

Величина  $J_r$  называется *остаточной намагниченностью*, она свидетельствует о том, ферромагнитное вещество, несмотря на исчезновение внешнего магнитного поля, создаёт свое внутреннее магнитное поле. *Коэрцитивная сила*  $H_c$  характеризует величину напряжённости поля обратного направления, которую необходимо создать, чтобы остаточная намагниченность стала равной нулю.

При отложении на оси ординат вместо намагниченности  $J$  значений индукции  $B$  получается петля гистерезиса по индукции. По этой зависимости

определяют остаточную индукцию  $B_r$  и коэрцитивную силу  $H_c$  гистерезисной петли по индукции ферромагнитного вещества (рис. 3.1, б).

Остаточная индукция (намагниченность) и коэрцитивная сила являются важнейшими характеристиками ферромагнитного вещества. Ферромагнитные вещества, имеющие малые значения коэрцитивной силы (меньше  $4 \div 8$  кА/м), называются *магнитномягкими*, а обладающие большой коэрцитивной силой (несколько десятков кА/м и более), - *магнитножесткими* (см. рис. 3.1, б).

Магнитномягкие материалы применяются для изготовления магнитопроводов магнитных систем, сердечников электромагнитов, полюсных наконечников магнитных систем и валков сепараторов, ферромагнитных тел высокоградиентных сепараторов. Эта область применения обусловлена высокой абсолютной магнитной проницаемостью (остаточной индукцией) и низким значением коэрцитивной силы («лёгкое» перемагничивание) магнитномягких материалов.

Магнитножесткие материалы, обладающие большим значением коэрцитивной силы и высоким значением остаточной индукции (создание сильного магнитного поля), используются для изготовления постоянных магнитов.

При магнитном обогащении магнетитовых и титаномagnetитовых руд, содержащих магнитножесткий магнетит и титаномagnetит (с высокой коэрцитивной силой), из отдельных частиц, вследствие их остаточной намагниченности, образуются агрегаты – флоккулы. Устойчивость флоккулы к внешним механическим воздействиям будет определять коэрцитивная сила магнетита или титаномagnetита конкретного месторождения. Для дефлокуляции пульп используются размагничивающие аппараты.

Напряжённость внешнего магнитного поля, намагниченность и магнитная индукция сильномагнитного минерала будут определять его магнитную проницаемость и объёмную магнитную восприимчивость. Если рассчитывать объёмную магнитную восприимчивость и абсолютную магнитную проницаемость по формулам (3.3) и (2.1) при разных значениях напряжённости внешнего магнитного поля по данным  $J$  и  $B$  первоначальной кривой намагничивания и петли гистерезиса (рис. 3.1), то получатся различные значения. Поэтому магнитная проницаемость и объёмная магнитная восприимчивость сильномагнитных минералов не являются постоянными величинами. Согласно магнитному гистерезису, эти величины будут зависеть от величины напряжённости внешнего магнитного поля и от предварительной намагниченности минерала.

### 3.4. Определение магнитных свойств минералов

Магнитные свойства веществ и тел определяют пондеромоторным и баллистическим методами [13, 21]. Для определения магнитных свойств минералов наибольшее применение получил пондеромоторный метод.

*Для определения магнитной восприимчивости слабомагнитных минералов применяют пондеромоторный метод, предложенный Фарадеем.*

При пондеромоторном методе определение магнитной восприимчивости минералов основано на взвешивании образцов, помещённых в магнитное поле. Поэтому такие установки для определения магнитных свойств минералов ещё называют «магнитные весы». Чем больше кажущийся «прирост массы» образца в магнитном поле, тем выше его магнитные свойства. При этом кажущийся «прирост массы» характеризует величину магнитной силы, действующей на образец.

Величину магнитной силы, действующей на образец в межполюсном зазоре электромагнита (рис. 3.2, а), рассчитать достаточно сложно. Поэтому магнитную восприимчивость образца определяют косвенным методом – сравнивают магнитные силы, действующие на исследуемый образец и эталон.

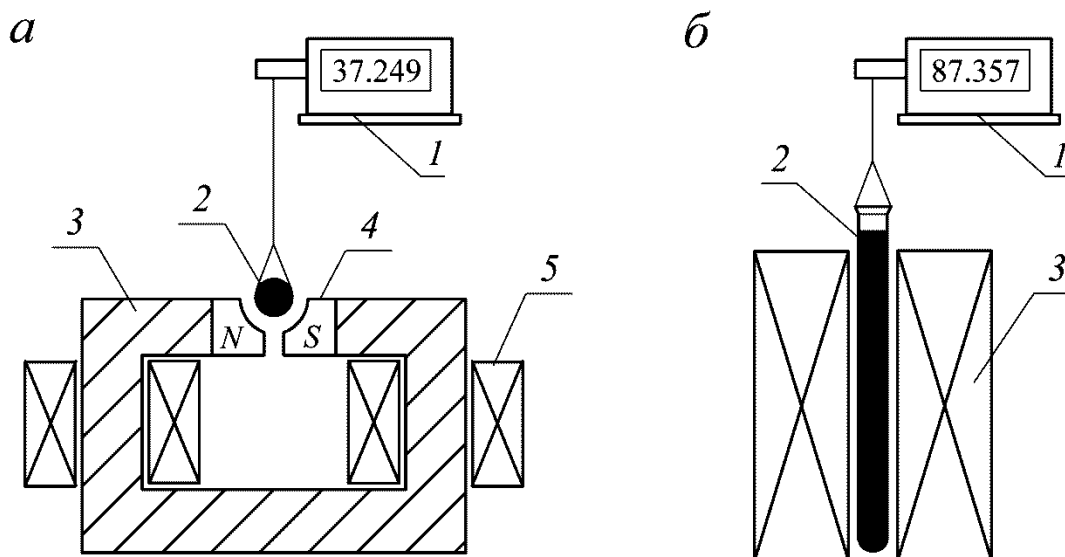


Рис. 3.2. Установки для определения магнитных свойств:

а – слабомагнитных минералов: 1 – весы; 2 – колбочка с образцом; 3 – магнитопровод; 4 – полюсные наконечники; 5 – обмотки возбуждения (катушки); б – сильномагнитных минералов: 1 – весы; 2 – цилиндр с образцом; 3 – электромагнитный соленоид

Установка для определения магнитной восприимчивости пондеромоторным методом состоит из весов 1, которыми измеряется «сила» притяжения исследуемых образцов 2 к электромагниту, состоящему из магнитопровода 3, по-

люсных наконечников 4 и обмоток возбуждения 5 (см. рис. 3.2, а). Электромагнит имеет полюса со скошенными поверхностями для обеспечения втягивания исследуемого образца в межполюсный зазор. Все части весов изготавливаются из немагнитного материала.

Порошок слабомагнитного материала насыпают в стеклянную колбочку до метки и помещают в зазор между полюсами. После этого устанавливают заданный ток в обмотке электромагнита и определяют кажущуюся «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  $Mn_2P_2O_7$  ( $\chi=8,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$ ), 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 для определения их массы.

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

$$\chi_{об} = \chi_{эт} m_{эт} \Delta m_{об} / (m_{об} \Delta m_{эт}), \quad (3.11)$$

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

Кажущиеся «приросты массы» образца и эталона в магнитном поле рассчитывают путём вычитания из кажущихся «масс» образца и эталона в магнитном поле масс образца и эталона при выключенном электромагните.

*Для определения магнитной восприимчивости сильномагнитных минералов применяют метод Гюи.*

Метод Гюи также относится к пондеромоторному методу. При методе Гюи оценка магнитной силы также осуществляется по величине кажущегося «прироста массы» образца в магнитном поле. Отличия заключаются в том, что исследуется «длинный» образец для снижения размагничивающего поля образца ( $N \rightarrow 0$ ). Кроме этого, взвешивание образца осуществляется в электромагнитном соленоиде с известным значением магнитной силы, что позволяет определять магнитную восприимчивость сильномагнитных минералов и продуктов без использования эталонов.

Немагнитный цилиндр, заполненный тонкоизмельчённым материалом, помещается в соленоидную катушку (рис. 3.2, б). При этом цилиндр будет втягиваться в соленоид с усилием, зависящим от магнитных свойств образца.

Магнитная сила, втягивающая цилиндр внутрь катушки:

$$F_m = g\Delta m = 0,5\mu_0\chi\rho_n S(H^2 - H_1^2), \quad (3.12)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с;  $\Delta m$  – кажущийся «прирост массы» образца в магнитном поле, кг;  $\chi$  – удельная магнитная восприимчивость образца, м<sup>3</sup>/кг;  $\rho_n$  – насыпная плотность образца, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь сечения образца, м<sup>2</sup>;  $H, H_1$  – напряжённость магнитных полей внутри и снаружи соленоида, А/м.

При измерениях верхний край образца находится снаружи соленоидной катушки, поэтому  $H_1 = 0$ . Учитывая, что  $m = \rho_n Sl$ , заменим в формуле (3.12)  $\rho_n S$  на  $m/l$ , где  $m$  – масса образца, кг;  $l$  – длина образца в трубке, м. Из равенства (3.12) найдем величину  $\chi$ :

$$\chi = 2lg\Delta m / (\mu_0 H^2 m) = K_m \Delta m / m, \quad (3.13)$$

где  $K_m$  – характеристика «магнитных весов»:  $K_m = 2lg / (\mu_0 H^2)$ .

Задача эксперимента заключается в определении  $\Delta m$  и последующих расчётах по формуле (3.13). Измерения выполняют также три-четыре раза, а затем по средним значениям рассчитывают удельную магнитную восприимчивость образца.

Этот метод позволяет определить не только удельную магнитную восприимчивость, но и значения намагничённости и магнитной индукции сильномагнитного образца для построения петли гистерезиса. Для этого необходимо выполнить измерения  $\chi$  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 сильномагнитного минерала по следующим формулам:

$$J = \chi\rho_n H; \quad (3.14)$$

$$B = \mu_0(H + J). \quad (3.15)$$

### **Пример**

На магнитных весах с помощью метода Фарадея выполнены измерения удельной магнитной восприимчивости марганцевой руды.

Удельная магнитная восприимчивость эталона  $\chi_{\text{эт}} = 9,55 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>/кг. Масса эталона и образца 80 и 75 г соответственно. Кажущаяся «масса» эталона и образца в магнитном поле  $m_{\text{эт(м)}} = 100$  и  $m_{\text{об(м)}} = 79$  г соответственно.

Рассчитать удельную магнитную восприимчивость образца марганцевой руды.

#### **Решение**

При расчётах значения всех величин использовать в системе СИ.

Рассчитываем кажущийся «прирост массы» эталона в магнитном поле:  $\Delta m_{\text{эт}} = 0,1 - 0,08 = 0,02$  кг. Рассчитываем кажущийся «прирост массы» образца в магнитном поле:  $\Delta m_{\text{об}} = 0,079 - 0,075 = 0,004$  кг. По формуле (3.11) рассчитываем удельную магнитную восприимчивость образца марганцевой руды:  $\chi_{\text{об}} = 2,04 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

#### **Пример**

На магнитных весах с помощью метода Гюи выполнены измерения удельной магнитной восприимчивости магнетитовой руды.

Внутренний диаметр цилиндра и длина образца в цилиндре  $d = 18,5$  и  $l = 60$  мм соответственно. Масса образца и кажущаяся «масса» образца в магнитном поле  $m = 38$  и  $m_{(\text{м})} = 252$  г. Напряжённость магнитного поля 127 кА/м.

Рассчитать удельную и объёмную магнитную восприимчивость образца магнетитовой руды. Рассчитать намагниченность и индукцию образца, находящегося во внешнем магнитном поле с напряжённостью 127 кА/м.

#### **Решение**

При расчётах значения всех величин использовать в системе СИ.

Рассчитываем кажущийся «прирост массы» образца в магнитном поле:  $\Delta m = 252 - 38 = 214 \text{ г} = 0,214 \text{ кг}$ . По формуле (3.13) рассчитываем удельную магнитную восприимчивость образца магнетитовой руды:  $\chi = 3,27 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Если плотность образца не известна, то рассчитываем площадь, объём и насыпную плотность:  $S = 2,688 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $V = 1,613 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ ;  $\rho_{\text{н}} = 2356,13 \text{ кг/м}^3$ . Тогда плотность образца можно найти:  $\rho = \rho_{\text{н}}/k_{\text{р}} = 4283,87 \text{ кг/м}^3$  (коэффициент плотности принят  $k_{\text{р}} = 0,55$ ).

Рассчитываем объёмную магнитную восприимчивость образца:  $\alpha = \chi \cdot \rho = 1,401$ .

Намагниченность и индукцию магнетитовой руды, находящейся во внешнем магнитном поле с напряжённостью 127 кА/м рассчитываем по формулам (3.14) и (3.15):  $J = 97,72 \text{ кА/м}$ ;  $B = 0,28 \text{ Тл}$ .

### **3.5. Магнитные свойства сильномагнитных минералов**

#### **Магнетит и титаномagnetит**

Магнетит и титаномagnetит относятся к сильномагнитным минералам, являются основными рудными минералами железорудных месторождений и используются для производства чугуна и стали.

Магнетит имеет химическую формулу  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Титаномagnetит является разновидностью магнетита с примесями Ti (1-7 %) и V. Иногда титаномagnetит называют магнетитом с включениями ульвошпинели и ильменита. Химическую формулу титаномagnetита приближённо можно записать следую-

щим образом:  $\text{FeO} \cdot (\text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_2\text{O}_3$ . Титаномагнетит не выделяют в отдельный минерал.

Теоретическая массовая доля железа в магнетите 72,4 %. Часто присутствуют примеси других металлов: Mg, Mn, Ca, Ti, V, Al, Cr. Массовая доля железа в титаномагнетите составляет 67-69 %.

Плотность – 4800÷5200 кг/м<sup>3</sup>. Цвет – чёрный. Твёрдость по шкале Мооса – 5÷6, хрупкий.

*Зависимость магнитной восприимчивости магнетита и титаномагнетита от напряжённости внешнего магнитного поля*

Зависимость магнитной восприимчивости магнетита и титаномагнетита от напряжённости внешнего магнитного поля носит экстремальный характер, что проиллюстрировано на рис. 3.3.

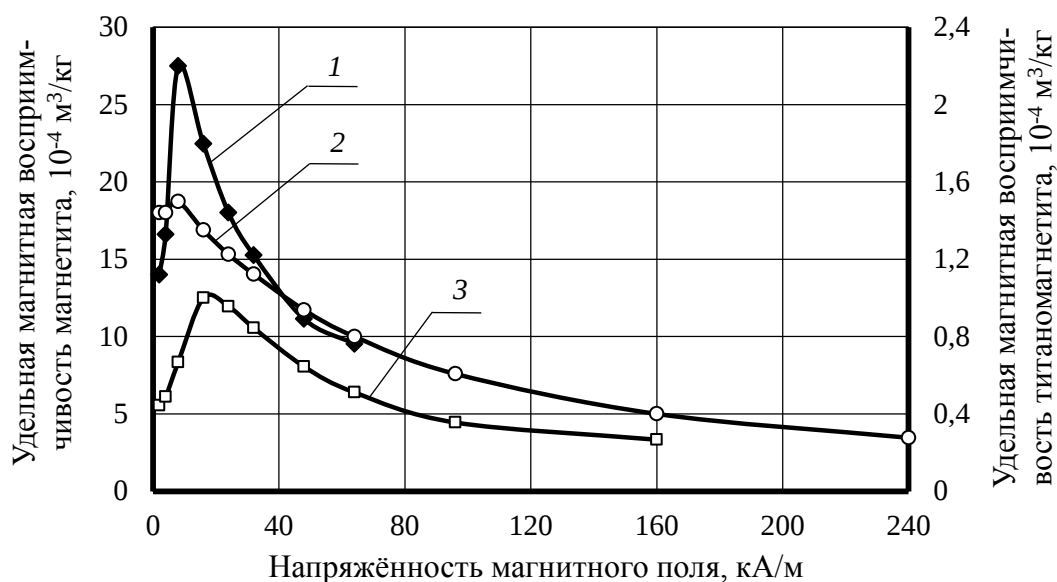


Рис. 3.3. Зависимость удельной магнитной восприимчивости магнетита и титаномагнетита от напряжённости внешнего магнитного поля:  
 1 – проба магнетита № 1 (по Петровой Г. Н.) [13]; 2 – проба магнетита № 2 (по Готшалку В. Х.) [13]; 3 – титаномагнетитовый концентрат (0-0,2 мм, 65,3 % Fe) [35]

Удельная магнитная восприимчивость магнетита при изменении напряжённости магнитного поля от 2 до 8 кА/м увеличивается от  $14 \cdot 10^{-4}$  до  $27,48 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$  (проба № 1) и от  $18 \cdot 10^{-4}$  до  $18,73 \cdot 10^{-4}$  (проба № 2). При дальнейшем увеличении напряжённости магнитного поля удельная магнитная восприимчивость магнетита снижается до  $9,53 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$  (при  $H=64 \text{ кА/м}$ , проба № 1) и далее – до  $3,46 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$  (при  $H=240 \text{ кА/м}$ , проба № 2) (см. рис. 3.3).

Намагниченность насыщения магнетита достигается при напряжённости внешнего магнитного поля около 320-400 кА/м. При такой напряжённости удельная магнитная восприимчивость снижается до  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$  [25].

Таким образом, удельная магнитная восприимчивость магнетита в зависимости от напряжённости внешнего магнитного поля может изменяться от  $1,5 \cdot 10^{-4}$  до  $27,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Удельная магнитная восприимчивость титаномагнетита (концентрат с массовой долей железа 65,3 %, крупность 0-0,2 мм) при изменении напряжённости магнитного поля от 2 до 16 кА/м увеличивается от  $0,44 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$  [35]. При дальнейшем увеличении напряжённости магнитного поля до 160 кА/м удельная магнитная восприимчивость титаномагнетита снижается до  $0,27 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$  (см. рис. 3.3).

Удельная магнитная восприимчивость титаномагнетита ниже, чем удельная магнитная восприимчивость магнетита. Она изменяется от  $0,27 \cdot 10^{-4}$  [35] до  $4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$  [19].

Сепарация магнетита осуществляется в магнитных полях с напряжённостью 110-120 кА/м. При этой напряжённости удельная магнитная восприимчивость магнетита составляет в среднем  $7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Единичные частицы магнетита имеют продолговатую форму, поэтому для них коэффициент размагничивания  $N$  принимают равным 0,16. Для единичных частиц магнетита при их плотности  $5000 \text{ кг/м}^3$  удельная магнитная восприимчивость тела, рассчитанная по формуле (3.10), при напряжённости 110-120 кА/м равна  $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Для мелких и тонких частиц, образующих в магнитном поле продолговатые флоккулы и пряди ( $N \approx 0$ ), удельная магнитная восприимчивость тела и вещества будут равны и составляют в среднем  $7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ . При магнитных измерениях использовался природный магнетит с примесями и включениями породных минералов. Поэтому для прядей и флокул чистого магнетита можно принять удельную магнитную восприимчивость равной  $8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$  при напряжённости внешнего магнитного поля 110-120 кА/м.

*Зависимость магнитной восприимчивости магнетита и титаномагнетита от крупности частиц*

Магнитная восприимчивость магнетита снижается при уменьшении его крупности. На рис. 3.4 приведены зависимости удельных магнитных восприим-

чивостей проб магнетита [13] и титаномагнетитового концентрата с массовой долей железа 65,3 % [35] от их крупности.

При уменьшении крупности пробы магнетита от 120 до 40 мкм его удельная магнитная восприимчивость незначительно снижается – от  $18 \cdot 10^{-4}$  до  $17 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг. При дальнейшем снижении крупности частиц от 40 до 2 мкм происходит более резкое снижение удельной магнитной восприимчивости магнетита от  $17 \cdot 10^{-4}$  до  $7,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг (см. рис. 3.4).

Для титаномагнетита при уменьшении крупности частиц от 200 до 40 мкм удельная магнитная восприимчивость снижается от  $1,03 \cdot 10^{-4}$  до  $0,46 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг (см. рис. 3.4).

Снижение удельной магнитной восприимчивости магнетита и титаномагнетита при уменьшении крупности частиц (при переизмельчении) приводит к повышению массовой доли железа магнетитового в хвостах операций мокрой магнитной сепарации (ММС) после последней стадии измельчения, что служит источником потерь железа при обогащении всех промышленных типов железных руд. Это подтверждено данными практики работы обогатительных фабрик и лабораторными испытаниями, приведёнными в табл. 3.2 (несколько повышенная массовая доля железа магнетитового в операции ММС-I связана с потерями магнетита с недораскрытыми крупными сростками).

Однако явление снижения удельной магнитной восприимчивости магнетита и титаномагнетита при уменьшении крупности частиц незначительно снижает извлечение магнетитового железа в готовый концентрат, так как выход хвостов последних операций ММС невысокий. Кроме этого, магнитная флокуляция магнетита и титаномагнетита приводит к образованию крупных агрегатов из отдельных частиц с более высокой удельной магнитной восприимчивостью. Это позволяет эффективно извлекать магнетитовые флокулы в магнитный продукт без увеличения индукции магнитного поля сепаратора, что необ-

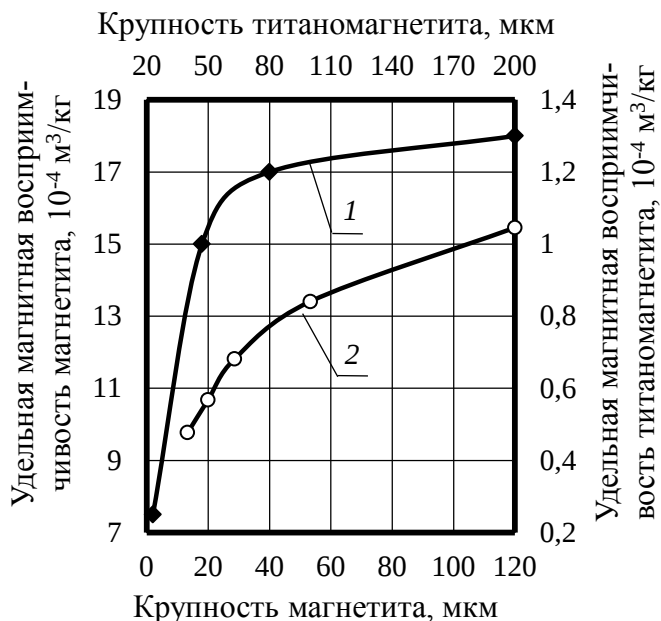


Рис. 3.4. Зависимость удельной магнитной восприимчивости магнетита и титаномагнетита от крупности частиц: 1 – магнетит; 2 – титаномагнетит

ходимо было бы сделать для обогащения отдельных тонких частиц магнетита (при отсутствии магнитной флокуляции).

Таблица 3.2

Массовая доля железа магнетитового в хвостах ММС в зависимости от стадии и крупности питания

| Тип руды, месторождение                                    | Стадия ММС | Крупность (массовая доля класса -71 (45) мкм), % | Массовая доля железа магнетитового, % |
|------------------------------------------------------------|------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Магнетитовая (скарновая) руда Высокогорского месторождения | I          | 32                                               | 1,0                                   |
|                                                            | II         | 70                                               | 1,4                                   |
| Титаномагнетитовая руда Гусевогорского месторождения       | I          | 22                                               | 0,65                                  |
|                                                            | II         | 35                                               | 0,46                                  |
|                                                            | III        | 72                                               | 0,95                                  |
|                                                            | IV         | 92                                               | 1,90                                  |
| Железистые кварциты Сутарского месторождения               | I          | 70                                               | 0,62                                  |
|                                                            | II         | 85 (-45 мкм)                                     | 0,48                                  |
|                                                            | III        | 98 (-45 мкм)                                     | 1,12                                  |

*Зависимость магнитной восприимчивости сростков от массовой доли в них магнетита*

Удельная магнитная восприимчивость сростка магнетита с другими минералами зависит практически только от массовой доли в нём магнетита. Это объясняется тем, что удельная магнитная восприимчивость слабомагнитных минералов более чем в 100 раз меньше удельной магнитной восприимчивости магнетита.

Для приблизительных расчётов объёмной магнитной восприимчивости сростка магнетита с другими минералами при напряжённости внешнего магнитного поля 60-140 кА/м используют эмпирическую формулу Бринга Г. Г., которая после преобразований выглядит следующим образом [13]:

$$\alpha_{\text{ср}} = \alpha_{\text{магн}}^2 \cdot \alpha_{\text{м}}, \quad (3.16)$$

где  $\alpha_{\text{магн}}$  – массовая доля магнетита в сростке, д. ед;  $\alpha_{\text{м}}$  – объёмная магнитная восприимчивость частиц чистого магнетита.

Удельная магнитная восприимчивость сростка магнетита с другими минералами:

$$\chi_{\text{ср}} = \alpha_{\text{магн}}^2 \cdot \chi_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{м}} / \rho_{\text{ср}}, \quad (3.17)$$

где  $\rho_{\text{м}}$  – плотность магнетита, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ср}}$  – плотность сростка, кг/м<sup>3</sup>.

Массовая доля магнетита в сростке определяется по формуле

$$\alpha_{\text{магн}} = \alpha_{\text{м}} / \alpha_{\text{Fe-м}}, \quad (3.18)$$

где  $\alpha_m$  – массовая доля железа магнетитового в сростке, д. ед;  $\alpha_{Fe-m}$  – массовая доля железа в магнетите (теоретическое значение равно 0,724), д. ед.

Если принять плотности магнетита и породных минералов равными 5000 и 2800 кг/м<sup>3</sup> и удельную магнитную восприимчивость магнетита тела и вещества – соответственно  $5 \cdot 10^{-4}$  и  $8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг, то удельную магнитную восприимчивость сростков магнетита с другими минералами можно рассчитать по формулам [13]:

$$\chi_{ср} = 1,13 \cdot 10^{-5} \alpha_{магн}^2 / (127 + \alpha_{магн}); \quad (3.19)$$

$$\chi_{ср} = 1,8 \cdot 10^{-5} \alpha_{магн}^2 / (127 + \alpha_{магн}). \quad (3.20)$$

Формула (3.19) справедлива для отдельных сростков (кусков руды), и по ней рассчитывают удельную магнитную восприимчивость тела. Формула (3.20) справедлива для мелких и тонких зёрен, образующих удлинённые пряди в магнитном поле. При этом принимается, что удельные магнитные восприимчивости тела и вещества равны, так как для удлинённой пряди коэффициент размагничивания  $N \approx 0$ .

Кармазин В. И. предложил использовать для расчёта удельной магнитной восприимчивости сростка магнетита, находящегося в слабом магнитном поле ( $H \leq 20$  кА/м), следующую формулу [22, 25]:

$$\chi_{ср} = \left( \frac{\alpha_m + b}{100 + b} \right)^3 \chi_m = 2,4 \cdot 10^{-11} (\alpha_{магн} + 27)^3, \quad (3.21)$$

где  $b$  – коэффициент, равный 27.

Вышерассмотренные формулы используются для приблизительных расчётов, так как в них не учитываются напряжённость внешнего магнитного поля, крупность и форма частиц.

В табл. 3.3 приведены экспериментальные и теоретические значения удельных магнитных восприимчивостей классов крупности железных концентратов, полученных в лабораторных и промышленных условиях из скарновой магнетитовой руды Естюнинского месторождения (Высокогорский ГОК) и из титаномагнетитовой руды Гусевгорского месторождения (Качканарский ГОК).

Экспериментальное определение удельной магнитной восприимчивости классов крупности железных концентратов выполнено пондеромоторным методом при напряжённости внешнего магнитного поля 48 кА/м.

Теоретический расчёт удельной магнитной восприимчивости выполнен по формуле (3.17) при плотностях магнетита (титаномагнетита) и породных минералов 5000 и 3000 кг/м<sup>3</sup> и удельных магнитных восприимчивостях магнетита и титаномагнетита  $9,5 \cdot 10^{-4}$  и  $4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг. Теоретические значения массовых долей железа в магнетите Естюнинского месторождения и в титаномагнетите Гусевогорского месторождения приняты равными 72 и 68 %. Формулы (3.19)-(3.21) не использованы, так как они получены для железистых кварцитов, в которых основным породным минералом является кварц с более низкой плотностью, чем у породных минералов скарновых магнетитовых и титаномагнетитовых руд.

Таблица 3.3

Экспериментальные и теоретические значения удельных магнитных восприимчивостей классов крупности железных концентратов

| Класс крупности, мм                                    | Массовая доля, % |                    |           | Плотность расчётная, кг/м <sup>3</sup> | Удельная магнитная восприимчивость, 10 <sup>-4</sup> м <sup>3</sup> /кг |           |
|--------------------------------------------------------|------------------|--------------------|-----------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
|                                                        | Fe               | Fe <sub>магн</sub> | магнетита |                                        | экспериментальная                                                       | расчётная |
| Концентрат из скарновой магнетитовой руды – 68,19 % Fe |                  |                    |           |                                        |                                                                         |           |
| -0,1+0,071                                             | 67,16            | 61,79              | 85,82     | 4716,31                                | 7,16                                                                    | 7,42      |
| -0,071+0,05                                            | 67,98            | 64,58              | 89,70     | 4793,92                                | 7,56                                                                    | 7,97      |
| -0,05+0                                                | 69,34            | 67,95              | 94,38     | 4887,59                                | 8,02                                                                    | 8,66      |
| Концентрат из титаномагнетитовой руды – 60,9 % Fe      |                  |                    |           |                                        |                                                                         |           |
| +0,14                                                  | 37,4             | 31,79              | 46,75     | 3935,00                                | 1,54                                                                    | 1,11      |
| -0,14+0,071                                            | 51               | 44,37              | 65,25     | 4305,00                                | 3,39                                                                    | 1,98      |
| -0,071+0,044                                           | 60,6             | 55,75              | 81,99     | 4639,76                                | 4,37                                                                    | 2,90      |
| -0,044+0                                               | 63,3             | 60,77              | 89,36     | 4787,29                                | 4,73                                                                    | 3,34      |

Для магнетита и титаномагнетита удельная магнитная восприимчивость увеличивается при снижении размеров зёрен класса крупности. Крупные классы представлены в основном сrostками, а мелкие классы – в основном зёрнами магнетита и титаномагнетита. Поэтому при уменьшении крупности класса в нём увеличиваются массовые доли железа, железа магнетитового и магнетита (титаномагнетита) и, как следствие, увеличивается удельная магнитная восприимчивость.

Значения удельных магнитных восприимчивостей, рассчитанные по формуле (3.17), несколько отличаются от значений, полученных экспериментальным путём (для скарновой магнетитовой руды небольшое завышение, для титаномагнетитовой руды – занижение). Эти различия можно объяснить неоднородностью минерального состава частиц и различием в крупностях частиц, так

как каждый класс представлен различным соотношением бедных и богатых сростков и зёрен магнетита различной крупности.

Расчёты по формулам (3.16)-(3.21) согласуются с экспериментальными данными, приведёнными в работе [13] и в табл. 3.3, и их можно использовать для приблизительного расчёта удельной магнитной восприимчивости сростка магнетита с другими минералами.

### **Пирротин**

К сильномагнитным минералам относится моноклинный пирротин  $\text{Fe}_7\text{S}_8$ . Его удельная магнитная восприимчивость изменяется от  $3,6 \cdot 10^{-5}$  до  $7 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/кг при напряжённости внешнего магнитного поля 32 кА/м. Коэрцитивная сила моноклинного пирротина достигает 9,6 кА/м, он относится к магнитножёстким минералам [13].

Массовая доля железа и серы составляет 60,4 и 39,6 %. Плотность – 4600-4700 кг/м<sup>3</sup>. Цвет – от бронзово-жёлтого до буро-коричневого. Твёрдость по шкале Мооса – 3,5-4,5, хрупкий.

При обогащении железных руд моноклинный пирротин извлекается вместе с магнетитом в магнитную фракцию в слабых магнитных полях, что приводит к повышению массовой доли серы в железном концентрате и снижает цену концентрата. Поэтому пирротин следует признать «вредным» минералом, если он присутствует в железной руде.

### **Маггемит**

Маггемит ( $\gamma$ -гематит), так же как и магнетит, имеет кубическую (шпинельную) кристаллическую решётку. Удельная магнитная восприимчивость –  $5 \cdot 10^{-4}$  -  $6 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг, магнитножёсткий минерал, коэрцитивная сила примерно в два раза выше, чем у магнетита [19].

Химическая формула  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . Массовая доля железа 69,9 %, примеси: Mg, Mn, Ca, Ti. Плотность – 4700-4900 кг/м<sup>3</sup>. Цвет – чёрный, синевато-чёрный или тёмно-бурый. Твёрдость по шкале Мооса – 5-6.

Маггемит – малораспространённый минерал, встречается в небольшом количестве, в основном в зоне окисления железорудных месторождений.

### **Ферросилиций**

Ферросилиций – искусственное соединение, применяемое в качестве утяжелителя при производстве суспензии, используемой в качестве среды разделения при тяжелосредной сепарации. Массовая доля Fe и Si составляет порядка 85 и 15 %. Плотность 6900 кг/м<sup>3</sup>.

Удельная магнитная восприимчивость ферросилиция, применяющегося при тяжелосреднем обогащении, зависит от процентного содержания в нём железа и составляет от  $8 \cdot 10^{-5}$  до  $7 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг [13]. Ферросилиций извлекают из отработанной водной суспензии для последующей её регенерации с помощью барабанных сепараторов со слабым магнитным полем.

### **3.6. Магнитная флокуляция магнетита и коэрцитивная сила**

Мелкие и тонкие частицы магнетита или другого сильномагнитного материала в магнитном поле образуют флокулы и пряди, ориентируемые вдоль магнитных силовых линий. Коэффициент размагничивания прядей меньше, чем у отдельной частицы, а удельная магнитная восприимчивость – больше. После выхода магнетитовой флокулы из рабочей зоны магнитного сепаратора (из магнитного поля) её намагниченность снизится до величины остаточной намагниченности и флокула распадется на несколько более мелких агрегатов-флокул. Способность отдельных частиц магнетита длительный промежуток времени сохранять остаточную намагниченность и образовывать устойчивые к внешним механическим воздействиям флокулы определяет коэрцитивная сила магнетита и титаномагнетита. Чем выше коэрцитивная сила, тем больше частиц будет содержаться во флокуле.

Образование магнитных прядей и флокул из частиц магнетита за счёт его намагниченности в магнитном поле положительно влияет на извлечение тонких частиц при мокром обогащении в барабанных сепараторах с нижней подачей материала, так как магнитная восприимчивость пряди выше, чем у отдельной частицы. На железообогатительных фабриках благодаря магнитной флокуляции магнетита извлечение железа магнетитового в концентрат не ниже 95 %. При этом массовая доля железа магнетитового в хвостах мокрого обогащения ниже 1 %.

С другой стороны, образование прядей и флокул снижает качество железных концентратов, так как в пряди и во флокулы «захватывается» некоторое количество немагнитных мелких частиц и слабомагнитных сростков, трудно удаляемых при сепарации. Чем выше коэрцитивная сила магнетита, тем больше немагнитных и слабомагнитных частиц будет содержаться во флокуле и тем сложнее будет получить магнетитовый концентрат высокого качества. Явление магнитной флокуляции магнетита не позволяет получать «суперконцентраты» с массовой долей магнетита более 96-98 % на многих обогатительных фабриках.

Свойство сильномагнитных измельчённых частиц образовывать флокулы и пряди также влияет на подготовительные и вспомогательные технологические операции схем обогащения.

Явление магнитной флокуляции отрицательно сказывается при классификации и тонком гидравлическом грохочении магнетитовых продуктов, так как размер флокул больше, чем размер отдельных частиц магнетита.

Большое содержание устойчивых магнетитовых флокул в железных концентратах отрицательно влияет на процесс их фильтрования, снижая производительность вакуум-фильтров и повышая влажность кека. Магнетитовые флокулы содержат внутри себя воду, которая не полностью удаляется при фильтровании.

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 полезно при сгущении магнетитовых концентратов и при обесшламливании магнетитовых промпродуктов и концентратов. В первом случае флокуляция увеличивает скорость осаждения сильномагнитных частиц и снижает необходимую площадь сгустителей, во втором – дополнительно способствует удалению в слив тонких шламистых частиц породы в восходящем потоке воды без значительных потерь магнетита со сливом дешламатора.

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

Как было отмечено, устойчивость магнетитовой флокулы к внешним механическим воздействиям и ее размер определяет коэрцитивная сила магнетита и титаномагнетита. В табл. 3.4 приведены значения коэрцитивной силы железных концентратов, полученных из основных промышленных типов руд.

Согласно данным, приведённым в табл. 3.4, магнетит относится к магнитномягкому веществу ( $H_c < 5$  кА/м). Титаномагнетит относится к магнитножёстким веществам ( $H_c = 5,4-8$  кА/м). Чем больше массовая доля  $TiO_2$  в титаномагнетитовом концентрате, тем выше его коэрцитивная сила. Наибольшей магнитной жёсткостью характеризуются искусственные магнетиты и маггемиты, полученные после обжига слабомагнитных руд ( $H_c = 9,2-10,4$  кА/м).

Таблица 3.4

## Коэрцитивная сила железных концентратов

| Месторождение                                                                                    | Массовая доля в концентрате, % |                  | Коэрцитивная сила, |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------|------|
|                                                                                                  | Fe                             | TiO <sub>2</sub> | Э                  | кА/м |
| <i>Искусственные магнетиты и маггемиты, полученные после обжига слабомагнитных руд</i>           |                                |                  |                    |      |
| Аккермановское (бурый железняк→магнетит) [13]                                                    | 57,8                           | —                | 130                | 10,4 |
| Аккермановское (бурый железняк→маггемит) [13]                                                    | 56,2                           | —                | 115                | 9,2  |
| Криворожское (мартит→магнетит) [13]                                                              | 68,2                           | —                | 129                | 10,3 |
| Вятское (сидерит→маггемит) [13]                                                                  | 60,8                           | —                | 120                | 9,6  |
| <i>Титаномагнетитовая и ильменит-титаномагнетитовая руды<br/>(титаномагнетитовый концентрат)</i> |                                |                  |                    |      |
| Копанское [13]                                                                                   | 60,0                           | 15,0             | 100                | 8,0  |
| Медведевское [35]                                                                                | 62,4                           | Н.д.             | 85                 | 6,8  |
| Гусевогорское [13]                                                                               | 63,7                           | 2,2              | 68                 | 5,4  |
| Гусевогорское [35]                                                                               | 60,5                           | Н.д.             | 100                | 8,0  |
| Гусевогорское (малотитанистый тип) [28]                                                          | 65,9                           | 2,32             | 82                 | 6,6  |
| Гусевогорское (нормальнотитанистый тип) [28]                                                     | 62,5                           | 3,49             | 93                 | 7,4  |
| <i>Магнетитовые (скарновые) руды</i>                                                             |                                |                  |                    |      |
| Высокогорское [13]                                                                               | 67,4                           | —                | 40                 | 3,2  |
| Северо-Песчанское [35]                                                                           | 69,5                           | —                | 41,5               | 3,3  |
| III Северное [35]                                                                                | 67,9                           | —                | 55,5               | 4,4  |
| Круглогорское [35]                                                                               | 68,5                           | —                | 45,5               | 3,6  |
| Таштагольское [13]                                                                               | 62,8                           | —                | 38,4               | 3,1  |
| Абаканское [35]                                                                                  | 65,4                           | —                | 30,0               | 2,4  |
| Соколовское [13]                                                                                 | 61,9                           | —                | 24,8               | 2,0  |
| Соколовское [35]                                                                                 | 70,6                           | —                | 35                 | 2,8  |
| Сарбайское [35]                                                                                  | 70,4                           | —                | 35,0               | 2,8  |
| Качарское [35]                                                                                   | 69,5                           | —                | 35,0               | 2,8  |
| <i>Железистые (магнетитовые) кварциты</i>                                                        |                                |                  |                    |      |
| Лебединское [13]                                                                                 | 69,9                           | —                | 48                 | 3,8  |
| Сутарское [35]                                                                                   | 67,9                           | —                | 63                 | 5,0  |
| Криворожское [35]                                                                                | 71                             | —                | 50                 | 4,0  |
| Кременчугское [13]                                                                               | 69,1                           | —                | 59                 | 4,7  |

Коэрцитивная сила магнетита и титаномагнетита зависит от крупности их частиц (рис. 3.5). При уменьшении крупности частиц возрастает коэрцитивная сила. Поэтому флокулы, состоящие из мелких частиц, более устойчивы к внешним механическим воздействиям. При обогащении тонкоизмельчённых магнетитовых промпродуктов после последней стадии измельчения образуются наиболее устойчивые флокулы из тонких частиц, в которые попадают и тонкие

частицы породных минералов. Повышенная устойчивость таких флокулов снижает полноту удаления тонких породных частиц в хвосты.

При обогащении железистых кварцитов и магнетитовых (скарновых) руд, содержащих магнитномягкий магнетит, размагничивание пульпы перед операциями классификации и фильтрования применяют не всегда. При обогащении титаномagnetитовых руд и при обогащении слабомагнитных железных руд после их обжига размагничивание пульпы перед операциями классификации и фильтрования применяют всегда, так как флокулы, образующиеся из частиц титаномagnetита и искусственных магнетитов и маггемитов, достаточно прочные и устойчивые к внешним механическим воздействиям.

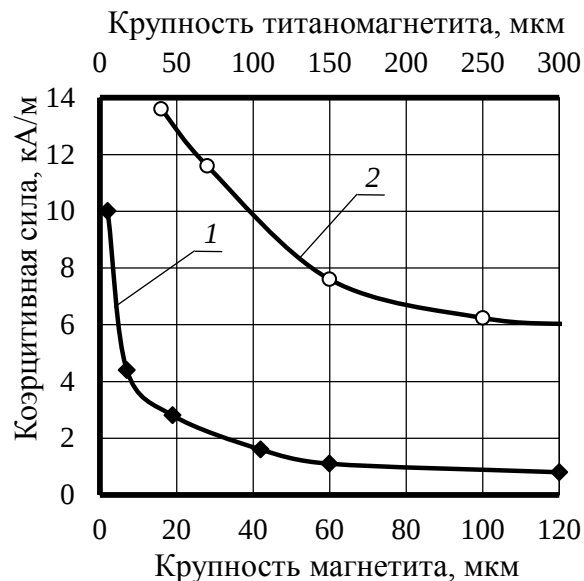


Рис. 3.5. Зависимость коэрцитивной силы магнетита и титаномagnetита от крупности частиц:  
1 – магнетит [13]; 2 – титаномagnetит [35]

По данным практики работы обогатительной фабрики Качканарского ГОКа, перерабатывающего титаномagnetитовую руду, использование размагничивания пульпы перед классификацией позволяет повысить эффективность классификации в гидроциклонах (табл. 3.5). При этом массовая доля класса -71 мкм в сливе увеличивается, а в песках уменьшается. При использовании размагничивания концентрата перед операцией фильтрования его влажность снижается в среднем на 0,5 %.

Таблица 3.5

Сравнительные испытания влияния размагничивания пульпы перед классификацией в гидроциклоне ГЦ-710

| Массовая доля класса -71 мкм, %                                         |         |          | Эффективность классификации, % |
|-------------------------------------------------------------------------|---------|----------|--------------------------------|
| в питании                                                               | в сливе | в песках |                                |
| Размагничивающий аппарат РА-4                                           |         |          |                                |
| 25,6                                                                    | 66,9    | 14,95    | 45,2                           |
| 26,5                                                                    | 65,0    | 15,4     | 44,2                           |
| Экспериментальный размагничивающий аппарат из постоянных магнитов (РАП) |         |          |                                |
| 29,63                                                                   | 62,6    | 19,9     | 36,1                           |
| Без размагничивания                                                     |         |          |                                |
| 36,2                                                                    | 54,2    | 29,3     | 21,6                           |

В табл. 3.6 приведены результаты фильтрования железных концентратов в лабораторной вакуум-фильтровальной установке с использованием предварительного размагничивания и без него.

Таблица 3.6

**Сравнительные испытания влияния размагничивания  
концентратов на их фильтрование**

| Массовая доля в концентрате, %               |                         | Влажность концентрата, % |                    |          |
|----------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|----------|
| железа                                       | класса -45 (-71) мкм, % | без размагничивания      | с размагничиванием | снижение |
| Железистые кварциты, Сутарское месторождение |                         |                          |                    |          |
| 65                                           | 96 (-45 мкм)            | 9,77                     | 9,33               | 0,44     |
| Титаномагнетитовая руда, Качканарский ГОК    |                         |                          |                    |          |
| 65                                           | 97 (-71 мкм)            | 9,65                     | 9,13               | 0,52     |

Использование предварительного размагничивания перед фильтрованием титаномагнетитового концентрата позволило снизить его влажность на 0,52 %, что согласуется с практикой работы Качканарского ГОКа.

При размагничивании магнитномягкого магнетита Сутарского месторождения перед фильтрованием также получено значительное снижение влажности концентрата (на 0,44 %), что связано с весьма низкой крупностью частиц концентрата (менее 45 мкм).

### **3.7. Магнитная восприимчивость слабомагнитных минералов рудных и нерудных полезных ископаемых**

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

В некоторых случаях слабомагнитные минералы гематит и ильменит проявляют магнитные свойства сильномагнитных минералов, но это связано в основном с наличием в гематите и ильмените примесей магнетита и титаномагнетита.

Наиболее полно изучены магнитные свойства марганцевых и железных слабомагнитных минералов, ильменита, вольфрамита и минералов титан-циркониевых россыпных месторождений. Значения удельной магнитной восприимчивости слабомагнитных марганцевых, железных и других минералов приведены в табл. 3.7, 3.8 [13, 14, 19, 37].

Таблица 3.7

Удельная магнитная восприимчивость железных и марганцевых минералов

| Минералы и вещества                                                                     | Содержание в чистом минерале Fe (Mn), % | Удельная магнитная восприимчивость, $10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$ |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Минералы и вещества железных руд                                                        |                                         |                                                                     |
| Мартит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )                                                      | 70                                      | До 88                                                               |
| Мартит с большой примесью гематита                                                      | 70                                      | До 44                                                               |
| Железистая слюдка-спекулярит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )                                | 70                                      | До 37                                                               |
| Гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )                                                     | 70                                      | От 1,4 до 22                                                        |
| Сидерит ( $\text{FeCO}_3$ )                                                             | 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                                                           |
| Гётит ( $\text{FeO} \cdot \text{OH}$ )                                                  | 62,9                                    | 3,2                                                                 |
| Лимонит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )                           | 46,5-47,6                               | 2-3                                                                 |
| Минералы и вещества марганцевых руд                                                     |                                         |                                                                     |
| Пиролюзит ( $\text{MnO}_2$ )                                                            | 63,1                                    | 3,8                                                                 |
| Манганит ( $\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )                           | 62,5                                    | 6,2                                                                 |
| Гаусманит ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ )                                                   | 72,0                                    | 7,2                                                                 |
| Вернадит ( $\text{MnO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ )                                   | До 52                                   | 5,2                                                                 |
| Землистые разности псиломелана (вад)                                                    | До 49,6                                 | 6,5                                                                 |
| ( $n\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ )               | До 49,6                                 | 8-8,5                                                               |
| Псиломелан плотный                                                                      | До 49,6                                 | 10-12                                                               |
| ( $n\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnO} \cdot m\text{H}_2\text{O}$ )                 | До 49,6                                 | 10-12                                                               |
| Псиломелан неплотный                                                                    | До 49,6                                 | 10-12                                                               |
| ( $n\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnO} \cdot m\text{H}_2\text{O}$ )                 | До 49,6                                 | 10-12                                                               |
| Браунит ( $\text{Mn}^{2+} \text{Mn}_6^{3+} \text{SiO}_{12}$ )                           | До 69,5                                 | 15,3                                                                |
| Родохрозит ( $\text{MnCO}_3$ ) и манганокальцит ( $(\text{Ca}, \text{Mn})\text{CO}_3$ ) | 47,8                                    | 17,2                                                                |

Таблица 3.8

Удельная магнитная восприимчивость некоторых слабомагнитных минералов

| Минералы                                                            | Удельная магнитная восприимчивость, $10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$ |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Франклинит ( $(\text{Zn}, \text{Mn})\text{Fe}_2\text{O}_4$ )        | 20-82                                                               |
| Ильменит ( $\text{FeTiO}_3$ )                                       | 1,6-96                                                              |
| Хромит ( $\text{Fe}^{2+} \text{Cr}_2^{3+} \text{O}_4$ )             | 2,6-27                                                              |
| Вольфрамит ( $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$ )                  | 3-12                                                                |
| Гранат                                                              | 0,1-20 (min – пироп; max – альмандин)                               |
| Гюбнерит ( $\text{MnWO}_3$ )                                        | До 10,3                                                             |
| Глауконит                                                           | До 7,9                                                              |
| Ставролит                                                           | До 4,6                                                              |
| Доломит ( $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$ ) с примесями Fe и Mn | До 3,4                                                              |
| Биотит                                                              | 3-7,6                                                               |
| Тальк с 2,2 % Fe (миннесотаит)                                      | 2,8                                                                 |
| Монацит                                                             | 1,5-3,2                                                             |
| Халькопирит ( $\text{CuFeS}_2$ )                                    | 0,08-0,5 (до 10 у магнитных разновидностей)                         |

Магнитная восприимчивость некоторых минералов варьирует в широком диапазоне, например франклинит  $(\text{Zn,Mn})\text{Fe}_2\text{O}_4$  и якобит  $(\text{MnFe}_2\text{O}_4)$  в зависимости от химического состава можно отнести как к сильномагнитным минералам, так и к слабомагнитным. Минимальная магнитная восприимчивость франклинита будет соответствовать минимальному содержанию Mn, а для якобита – максимальному содержанию примесей (Mg, Ca, Zn).

### 3.8. Магнитная восприимчивость слабомагнитных породных минералов

При магнитном обогащении слабомагнитных минералов полезных ископаемых часто с помощью сепарации в сильном магнитном поле не удаётся получить готовый концентрат. Получают только черновой концентрат, который доводят до требуемого качества с помощью других методов обогащения. Это происходит в связи с тем, что магнитная восприимчивость некоторых породных минералов значимо не отличается от магнитной восприимчивости, например, таких рудных минералов, как гематит и ильменит. При этом в магнитный продукт извлекаются как полезные слабомагнитные минералы, так и слабомагнитные породные минералы.

В табл. 3.9 приведены удельные магнитные восприимчивости слабомагнитных породных минералов железных руд.

Таблица 3.9

Удельная магнитная восприимчивость слабомагнитных породных минералов железных руд

| Минералы                  | Удельная магнитная восприимчивость,<br>$10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$ |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Куммингтонит (амфибол)    | 3,5                                                                    |
| Грюнерит (амфибол)        | >3,5                                                                   |
| Амфиболы                  | 0,1-12 (max у антофиллита)                                             |
| Биотит                    | 3-7,6                                                                  |
| Хлорит                    | 0,5-3                                                                  |
| Гранат                    | 0,1-20 (min – пироп; max – альмандин)                                  |
| Пироксены                 | 1,5-5,6                                                                |
| Эпидот                    | 0,2-2,4                                                                |
| Оливин                    | 1,8                                                                    |
| Серпентин                 | 1,3-4,9                                                                |
| Роговая обманка (амфибол) | до 3,7                                                                 |
| Шпинель                   | 1,3-5                                                                  |

При обогащении сильномагнитного магнетита и титаномagnetита слабомагнитные породные минералы с бóльшей долей вероятности захватываются в магнетитовые флокулы, чем немагнитные породные минералы. Это приводит к снижению качества магнетитового концентрата.

При обогащении железистых кварцитов в основном получают только магнетитовый концентрат. Гематит, содержащийся в железистых кварцитах и имеющий весьма тонкую вкрапленность (размер зёрен менее 71 мкм), в основном не обогащают в связи с трудностью получения концентрата требуемого качества (по данным практики работы Михайловского и Кимкано-Сутарского ГОКов). Во многом это связано с тем, что удельные магнитные восприимчивости гематита и породных минералов куммингтонита и грюнерита значимо не отличаются, и использование только высокоградиентной сепарации не позволяет получать готовый концентрат, так как в магнитный продукт извлекается гематит вместе с амфиболами. Для повышения качества гематитового концентрата необходимо дополнительно использовать другие методы обогащения (гравитационный, флотационный), что приводит к низкой рентабельности производства гематитового концентрата.

В табл. 3.10 приведены результаты обогащения двух проб железистых кварцитов Сутарского месторождения в лабораторном высокоградиентном сепараторе ( $B=0,6$  Тл) с целью оценки возможности получения гематитового концентрата из немагнитных продуктов мокрого обогащения в слабом магнитном поле.

Таблица 3.10

Результаты высокоградиентной магнитной сепарации немагнитного продукта ММС-III (железистые кварциты Сутарского месторождения)

| Исходный продукт, крупность                                                    | Продукт     | Выход, % | Массовая доля железа, % | Извлечение железа, % |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------|-------------------------|----------------------|
| Проба № 1 – магнетитовый тип руды (силикат-гематит-магнетитовая разновидность) |             |          |                         |                      |
| Немагнитный продукт ММС-III, 95 % класса -0,044 мм                             | Магнитный   | 35,39    | 26,70                   | 52,5                 |
|                                                                                | Немагнитный | 64,61    | 13,23                   | 47,5                 |
|                                                                                | Исходный    | 100,00   | 18,00                   | 100,0                |
| Проба № 2 – гематитовый тип руды (магнетит-гематитовая разновидность)          |             |          |                         |                      |
| Немагнитный продукт ММС-III, 98 % класса -0,044 мм                             | Магнитный   | 51,13    | 61,40                   | 92,1                 |
|                                                                                | Немагнитный | 48,87    | 5,54                    | 7,9                  |
|                                                                                | Исходный    | 100,00   | 34,10                   | 100,0                |

Проба № 1 представлена магнетитовым природным типом руды (в основном силикат-гематит-магнетитовой разновидностью) с содержанием амфиболов (куммингтонит и грюнерит) около 7,5 %. При высокоградиентной сепарации в магнитный продукт извлеклись гематит, амфиболы и бедные сростки кварца с магнетитом, что не позволило получить гематитовый концентрат с массовой долей железа более 60 %.

Проба № 2 представлена гематитовым природным типом руды (магнетит-гематитовая разновидность) с незначительным содержанием амфиболов. При высокоградиентной сепарации в магнитный продукт извлеклись гематит и бедные сростки кварца с магнетитом. Это позволило получить гематитовый концентрат с массовой долей железа более 60 %.

При обогащении ильменит-титаномagnetитовых руд в цикле получения ильменитового концентрата применяют высокоградиентную сепарацию. Высокоградиентная сепарация позволяет получить только черновой ильменитовый концентрат. Это связано с тем, что удельные магнитные восприимчивости ильменита и породных минералов (пироксен, роговая обманка, хлорит, биотит, эпидот) значимо не отличаются и использование только высокоградиентной сепарации не позволяет получать готовый концентрат, так как в магнитный продукт извлекаются ильменит вместе с породными минералами. Для получения ильменитового концентрата дополнительно используют другие методы обогащения (электрический или флотационный).

В табл. 3.11 приведены результаты обогащения пробы ильменит-титаномagnetитовой руды месторождения Большой Сейим в лабораторном высокоградиентном сепараторе ( $B=1,5$  Тл) с целью оценки возможности получения ильменитового концентрата из немагнитных продуктов мокрого обогащения в слабом магнитном поле.

Таблица 3.11

Результаты высокоградиентной магнитной сепарации немагнитного продукта ММС-I (ильменит-титаномagnetитовая руда месторождения Большой Сейим)

| Исходный продукт, крупность                   | Продукт     | Выход, % | Массовая доля $TiO_2$ , % | Извлечение $TiO_2$ , % |
|-----------------------------------------------|-------------|----------|---------------------------|------------------------|
| Немагнитный продукт ММС-I, Крупность 0-0,5 мм | Магнитный   | 40,72    | 26,42                     | 89,8                   |
|                                               | Немагнитный | 59,28    | 2,07                      | 10,2                   |
|                                               | Исходный    | 100,00   | 11,98                     | 100,0                  |

При высокоградиентной сепарации в магнитный продукт извлеклись ильменит и породные минералы, что не позволило получить ильменитовый

концентрат с массовой долей  $\text{TiO}_2$  не менее 48 %. Дальнейшее измельчение полученного магнитного продукта до крупности 0-0,2 мм и вторая стадия высокоградиентной магнитной сепарации позволили получить черновой ильменитовый концентрат (магнитный продукт) с массовой долей диоксида титана 34,16 %. Готовый ильменитовый концентрат с массовой долей диоксида титана 48 % был получен с помощью электрической сепарации.

Вышеприведённые примеры показывают, что при разработке схем с магнитным обогащением важно знать магнитные свойства не только полезных, но и породных минералов.

## **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. 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, установленных параллельно для повышения производительности или последовательно для пересортировки магнитного или немагнитного продуктов либо их обоих. 3. Питатель для подачи материала. 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.

#### **Классификация магнитных сепараторов**

*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 руд и продуктов. Первая группа аппаратов предназначена для обогащения сильномагнитных руд ( $H$  до 160-240 кА/м). Вторая группа аппаратов применяется для сепарации слабомагнитных руд ( $H$  более 160-240 кА/м).*

По типу среды, в которой осуществляется разделение, сепараторы подразделяют на аппараты для сухого и мокрого обогащения. Максимальная крупность частиц руды для сепараторов первой группы составляет 300 мм, а для сепараторов второй группы обычно не превышает 5 мм.

По способу подачи исходного сырья в рабочую зону сепараторы подразделяют на сепараторы с верхней подачей исходного материала и на сепараторы с нижней подачей. В первой группе аппаратов разделяемый продукт подается непосредственно на транспортирующее устройство (барабан, ролик, ленту и др.), которое впоследствии 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 подразделяют на прямоточные, противоточные и полупротивоточные (рис. 4.1).

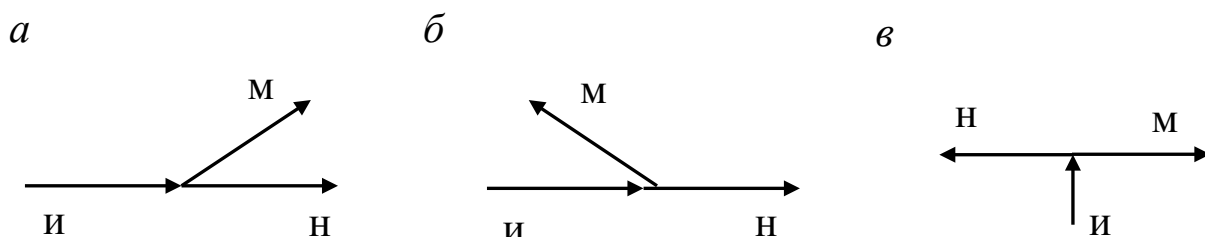


Рис. 4.1. Схемы движения продуктов в сепараторах с нижней подачей:  
*а* – прямоточный; *б* – противоточный; *в* – полупротивоточный;  
 и – исходный; м – магнитный; н – немагнитный

В прямоточных сепараторах исходный и немагнитный продукты движутся в одном направлении, а угол между траекториями движения магнитного и немагнитного продуктов менее  $90^{\circ}$  (рис. 4.1, *а*). В противоточных сепараторах исходный и немагнитный продукты движутся в одном направлении, а магнитный продукт – в противоположном направлении. Угол между траекториями движения магнитного и немагнитного продуктов более  $90^{\circ}$  (рис. 4.1, *б*). В полу-

противоточных сепараторах исходный продукт в виде пульпы подаётся снизу под давлением, а магнитный и немагнитный продукты движутся в разные стороны (рис. 4.1, в).

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

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

У аппаратов без магнитного перемешивания полюса чередуются по длине барабана (рис. 4.2, а). У аппаратов с магнитным перемешиванием полюса чередуются по периметру обечайки барабана (по ходу движения материала) (рис. 4.2, б).

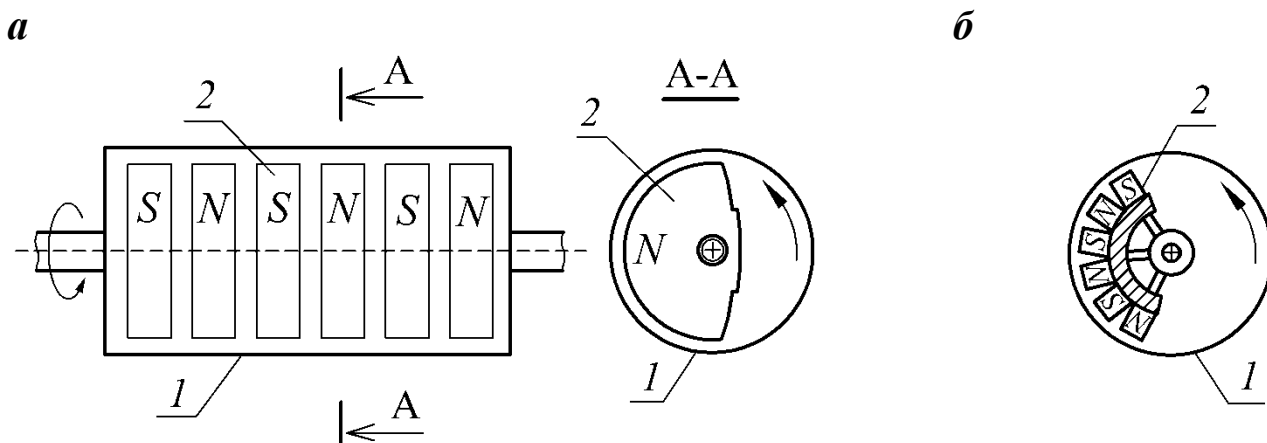


Рис. 4.2. Виды чередования полюсов открытых многополюсных систем: а – чередование полюсов по длине барабана; б – чередование полюсов по периметру обечайки барабана; 1 – барабан; 2 – многополюсная магнитная система

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

Сепараторы с чередованием полюсов по ходу движения материала получили большее применение.

По типу магнитной системы сепараторы подразделяют на аппараты с электромагнитной системой и аппараты с системой из постоянных магнитов.

Первые аппараты потребляют дополнительную электроэнергию для питания электромагнитной системы, 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 подразделяют на аппараты с открытой и с замкнутой рабочей зоной и с зоной разделения, заполненной полиградиентной средой (ферромагнитными телами). К первым относятся сепараторы с открытыми многополюсными системами, ко вторым – сепараторы с замкнутыми системами, к третьим – высокоградиентные сепараторы. Первые характеризуются расположением рабочей зоны разделения с одной стороны от всех полюсов, вторые – расположением рабочей зоны между полюсами. Высокоградиентные сепараторы характеризуются использованием для создания высоких значений индукции 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 (величина зазора обратно пропорционально влияет на магнитную силу). Крупность обогащаемого материала полиградиентных сепараторов ещё ниже, так как она ограничена расстояниями между ферромагнитными телами.

Высокоградиентные 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 подразделяют 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 по ГОСТ 10512-93 [6] обозначают 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; Д – диск; Л – лента и др.

Третья буква – тип среды: С – для сухого обогащения; М – для мокрого обогащения.

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.

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

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

Могут использоваться дополнительные буквы и цифры, характеризующие особенности конструкции аппарата.

#### *Примеры обозначения магнитных сепараторов*

ЭБС-80/170 – электромагнитная система, барабанный сепаратор для сухого обогащения, диаметр барабана 80 см; длина барабана 170 см. 2ПБС-90/250 – система из постоянных магнитов, барабанный сепаратор для сухого обогащения, диаметр барабана 90 см; длина барабана 250 см; число барабанов – два. ПБМ-П-90/250 – система из постоянных магнитов, барабанный сепаратор для мокрого обогащения; диаметр барабана 90 см; длина барабана 250 см; противоточный. ПБМ-ПП-120/300 – система из постоянных магнитов, барабанный сепаратор для мокрого обогащения; диаметр барабана 120 см; длина барабана 300 см; полупротивоточный. 4ЭВМ-38/250 – электромагнитная система, валковый сепаратор для мокрого обогащения; диаметр валка 38 см; длина валка 250 см; число валков – четыре. ПБСЦ-63/50 – система из постоянных магнитов, барабанный центробежный сепаратор для сухого обогащения, 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 обогащения сильномагнитных руд**

К данной группе аппаратов относятся барабанные и шкивные сепараторы типа ПБС, ЭБС и шкивные сепараторы. Сепараторы с электромагнитными системами для обогащения сильномагнитных руд в настоящее время практически не применяются.

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 имеет преимущественное применение.

Способ подачи материала может быть любым, но в основном – верхний (нижняя подача материала применяется весьма редко). Рабочая зона разделения открытая, поэтому крупность исходного материала для сепараторов с верхней подачей практически не ограничена (до 300 мм).

Магнитные системы барабанных сепараторов для обогащения сильномагнитных руд в основном изготавливают из постоянных магнитов из феррита бария и феррита стронция ( $B$  до 0,2 Тл). Для повышения индукции магнитного поля (до 0,4 Тл) используют редкоземельные постоянные магниты – в основном «неодимовые» Nd-Fe-B (например,  $Nd_2Fe_{14}B$ ), реже из Sm-Co (например,  $SmCo_5$ ). Повышение индукции магнитного поля сепараторов применяется для снижения потерь железа магнетитового с немагнитным продуктом, для повышения производительности сепаратора или при высокой крупности частиц исходного материала (более 100 мм).

*Основное применение* сепараторов для сухого обогащения сильномагнитных (железных) руд – предварительное обогащение крупнокусковой магнетитовой руды с целью вывода из процесса немагнитного продукта перед измельчением. Это позволяет снизить затраты на измельчение (50-60 % затрат на электроэнергию при обогащении железных руд приходится на измельчение).

Снижение нагрузки на мельницы первой стадии более чем на 5 % за счёт вывода из процесса немагнитного продукта на стадии рудоподготовки позволяет получить экономический эффект. Немагнитный продукт после классификации по крупности используется в качестве строительных материалов.

Схемы предварительного обогащения магнетитовых руд с помощью сухой магнитной сепарации чаще включают удаление хвостов только после третьей стадии дробления (0-30 мм). Но применяются и схемы с удалением хвостов как после второй стадии дробления (0-80 мм), так и после первой стадии дробления (0-300 мм). Большая крупность исходного продукта, даже при монослойной его подаче, позволяет получать высокие значения производительности сепараторов.

### **Барабанные сепараторы**

#### *Сепараторы с верхней подачей материала*

Барабанные сепараторы с верхней подачей имеют общую принципиальную конструкцию, в них реализуется способ разделения, за счёт удерживания магнитных частиц на транспортирующей поверхности (на обечайке барабана) и их последующего транспортирования в зону разгрузки (см. рис. 1.1, а).

В России основным производителем барабанных сепараторов для сухого обогащения является завод «Рудгормаш» (г. Воронеж). Сепараторы также выпускают компании «Механобр-техника» (г. С-Петербург), «Эрга» (г. Калуга), «Магнетар» (г. Озёрск). Технические характеристики основных барабанных сепараторов завода «Рудгормаш» приведены в табл. 4.1 (данные взяты из официального каталога и с сайта завода [75]).

Таблица 4.1

Основные технические характеристики барабанных сепараторов для сухого обогащения сильномагнитных руд

| Сепаратор                 | Максимальная крупность питания, мм | Производительность, т/ч | Индукция на поверхности барабана, Тл | Мощность привода, кВт | Масса, кг | Габаритные размеры, мм |
|---------------------------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------|------------------------|
| Однобарабанные сепараторы |                                    |                         |                                      |                       |           |                        |
| ПБС-63/50                 | 4                                  | 2 – 6                   | 0,13                                 | 1,1                   | 550       | 900x1300x1400          |
| ПБС-90/150                | 15                                 | 100                     | 0,15                                 | 5,5                   | 3700      | 2500x2500x2000         |
| ПБС-90/150А               | 50                                 | 100 – 140               | 0,24                                 | 11                    | 3700      | 2500x2500x2000         |
| ПБС-90/250А               | 50                                 | 150 – 300               | 0,24                                 | 11                    | 5000      | 3500x2500x2000         |
| Двухбарабанные сепараторы |                                    |                         |                                      |                       |           |                        |
| 2ПБС-90/150               | 25                                 | 300                     | 0,15                                 | 8                     | 7000      | 2500x2500x3250         |
| 2ПБС-90/150А              | 60                                 | 300 – 360               | 0,24                                 | 15                    | 7000      | 2500x2500x3250         |
| 2ПБС-90/250               | 25                                 | 500                     | 0,15                                 | 8                     | 8500      | 3500x2500x3250         |
| 2ПБС-90/250А              | 60                                 | 500 – 600               | 0,24                                 | 15                    | 8500      | 3500x2500x3250         |

Буква «А» в обозначении сепаратора указывает на повышенную индукцию магнитного поля сепаратора (использование магнитов из Nd-Fe-B). Максимальная крупность кусков питания сепаратора может изменяться в зависимости от свойств исходной руды (магнитные свойства, доля сильномагнитных кусков). Производительность сепараторов приведена максимальная (пропускная). Реальная (технологическая) производительность сепаратора, как правило, ниже, например, на обогатительной фабрике Качканарского ГОКа производительность сепараторов 2ПБС-90/250 и 2ПБС-90/250А не превышает 250 т/ч.

На рис. 4.3, а приведена конструкция сепаратора ПБС-90/150. Сепаратор работает следующим образом.

Исходный продукт из бункера-питателя 3 поступает на вращающийся барабан 1. Магнитные частицы притягиваются к неподвижной магнитной системе 2 и транспортируются барабаном до участка окончания магнитной системы, где магнитные частицы отрываются от барабана 1 и попадают в свой приёмник. Немагнитные частицы под действием гравитационной и центробежной сил отрываются от барабана раньше магнитных частиц и попадают в свой приёмник. Для очистки барабана от пылевидных частиц в месте окончания магнитной системы устанавливается очистительное устройство 5. Отсос пылевидных частиц осуществляется через аспирационные патрубки 6.

Для регулирования качества и количества продуктов разделения служит делитель или шибер 4. При повороте шиберов влево уменьшается выход немагнитного продукта, снижается содержание магнитных частиц в немагнитном и магнитном продуктах. При повороте шиберов вправо уменьшается выход магнитного продукта, повышается содержание магнитных частиц в немагнитном и магнитном продуктах.

Другие однобарабанные сепараторы работают аналогично.

На рис. 4.3, б приведена конструкция сепаратора 2ПБС-90/250. Двухбарабанный сепаратор работает следующим образом.

Исходный продукт из бункера-питателя поступает на верхний вращающийся барабан. Магнитные частицы притягиваются к неподвижной магнитной системе и транспортируются верхним барабаном до участка окончания магнитной системы, где магнитные частицы отрываются от барабана и попадают в свой приёмник. Немагнитные частицы под действием гравитационной и центробежной сил отрываются от верхнего барабана раньше магнитных частиц и поступают на нижний барабан, где происходит их аналогичное разделение на промпродукт (магнитный-2) и отвальные хвосты (немагнитный). Сепаратор

позволяет получить три продукта: магнитный-1, магнитный-2 и немагнитный. В этом сепараторе магнитный-1 и магнитный-2 продукты объединяют. Для регулирования качества и количества продуктов разделения нижнего барабана служит делитель или шибер. Для очистки барабанов от налипших на них мелких частиц служат очистительные устройства.

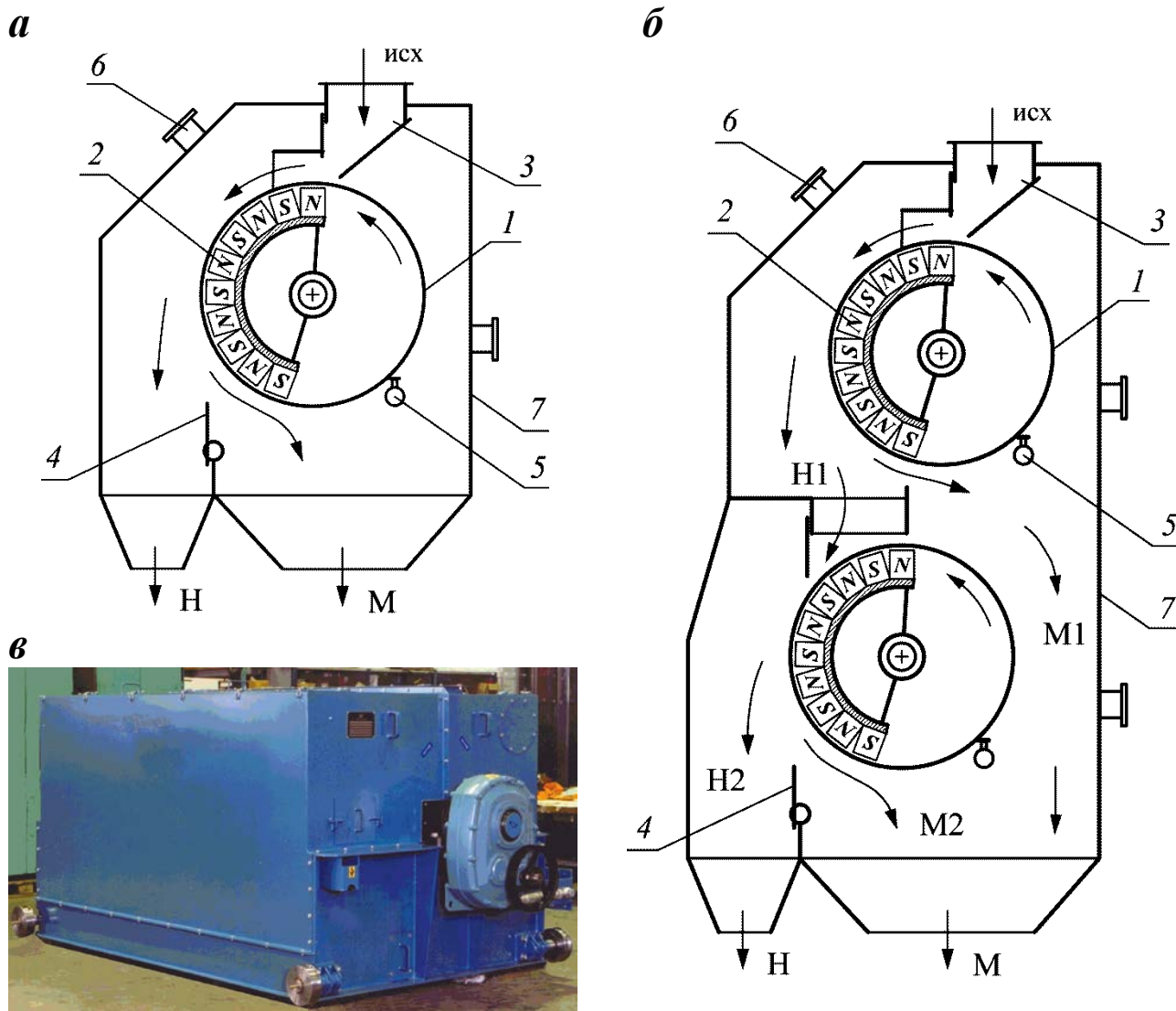


Рис. 4.3. Барабанные магнитные сепараторы для сухого обогащения сильномагнитных руд:

*а* – сепаратор ПБС-90/150; *б* – сепаратор 2ПБС-90/250; *в* – однобарабанный модульный сепаратор «Sala» модели «DS» компании «Metso Minerals»;  
 1 – вращающийся барабан; 2 – неподвижная система из постоянных магнитов;  
 3 – бункер-питатель; 4 – делитель (шибер); 5 – очистительное устройство;  
 6 – аспирационный патрубок; 7 – корпус

Магнитный продукт верхнего барабана более высокого качества по сравнению с магнитным продуктом нижнего барабана. Это достигается более высо-

кой скоростью вращения верхнего барабана и меньшей индукцией магнитного поля верхнего барабана по сравнению с нижним барабаном.

В сепараторе 2ПБС-90/250 реализована схема, приведённая на рис. 4.4, *а*. Эта схема позволяет получить хвосты с минимальными потерями магнетита. Промпродукт сухой магнитной сепарации поступает на измельчение и мокрое магнитное обогащение.

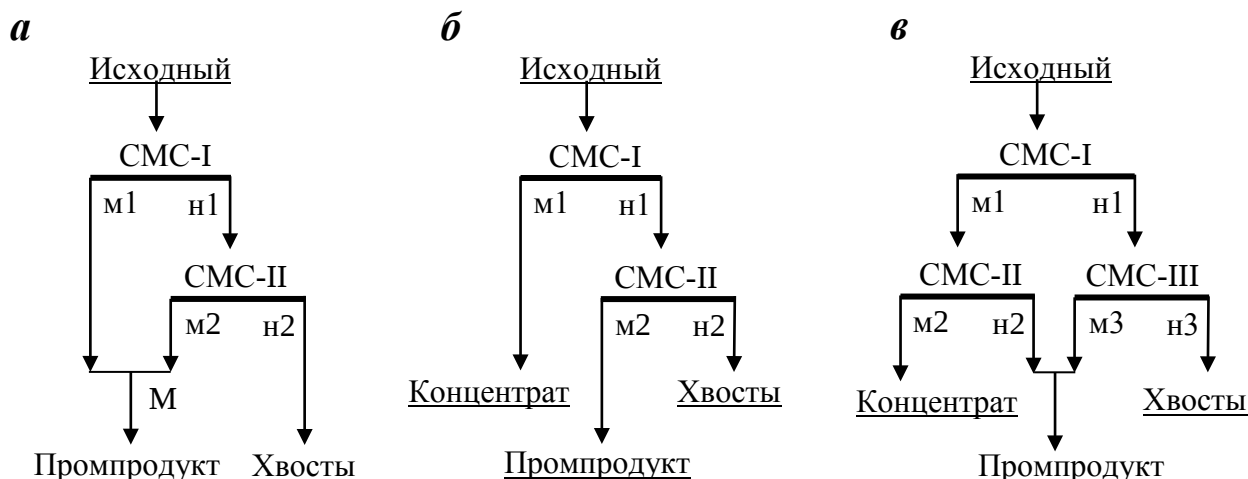


Рис. 4.4. Схемы обогащения, реализуемые в многобарабанных магнитных сепараторах для сухого обогащения сильномагнитных руд:

*а* – двухбарабанный сепаратор для получения промпродукта и хвостов;

*б* – двухбарабанный сепаратор для получения концентрата, промпродукта и хвостов;

*в* – трёхбарабанный сепаратор для получения концентрата, промпродукта и хвостов;

СМС – сухая магнитная сепарация

Если из мелкодроблёной руды можно получить готовый концентрат (агломерату), то используются двухбарабанные сепараторы, в которых реализуется схема обогащения, приведённая на рис. 4.4, *б*. В таком сепараторе магнитный продукт верхнего барабана является концентратом, а немагнитный продукт направляется на нижний барабан для получения промпродукта (магнитный-2) и хвостов (немагнитный-2).

Для получения концентрата, промпродукта и хвостов из мелкодроблёной руды также используются трёхбарабанные сепараторы, в которых реализуется схема обогащения, приведённая на рис. 4.4, *в*. В трёхбарабанном сепараторе магнитный и немагнитный продукты верхнего барабана направляются на раздельное обогащение на два нижних барабана с получением концентрата (магнитный-2), промпродукта (немагнитный-2 и магнитный-3) и хвостов (немагнитный-3).

Многие компании для изготовления многобарабанных сепараторов, в которых реализуется требуемое количество операций сухой магнитной сепарации, используют однобарабанные сепараторы-модули. На рис. 4.3, в приведена фотография однобарабанного модульного сепаратора «Sala» модели «DS» компании «Metso Minerals» [76]. Из таких модулей-сепараторов можно компоновать многобарабанные сепараторы.

#### *Сепараторы с нижней подачей материала*

Барабанные сепараторы с нижней подачей исходного материала практически не применяются для сухого магнитного обогащения сильномагнитных руд. Однако такие сепараторы позволяют получить магнитный продукт с меньшим содержанием немагнитных частиц.

Рассмотрим принципиальную конструкцию барабанного сепаратора с нижней подачей исходного материала на примере сепаратора ЭБС-80/170 (рис. 4.5).

Сепаратор предназначен для сухого магнитного обогащения магнетитовых руд крупностью  $-15+0$  мм. Магнитная система сепаратора электромагнитная с чередованием полярности полюсов по длине барабана. Направление движения исходного и магнитного продуктов – противоточное.

Исходный продукт из бункера 3 поступает на виброкаскадный питатель 4, выполненный в виде трёхступенчато 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 и транспортируются барабаном 1 против хода движения исходного продукта. В дальнейшем магнитные частицы подымаются барабаном в верхнюю часть, где заканчивается магнитная система, проходят верхнюю часть барабана и разгру-

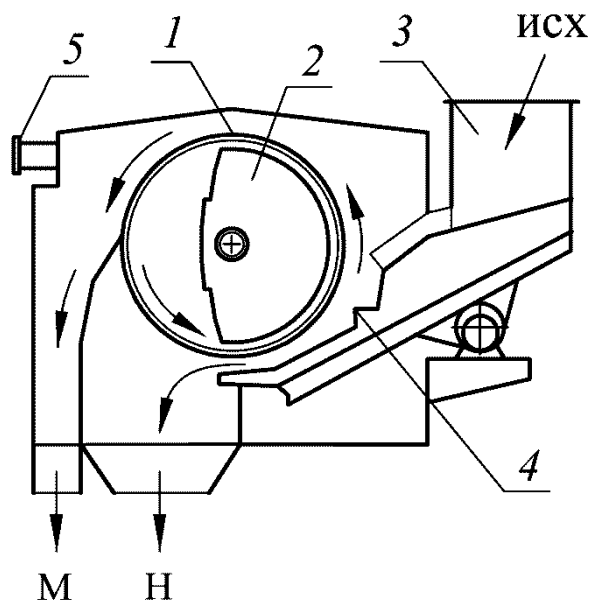


Рис. 4.5. Сепаратор ЭБС-80/170:  
1 – вращающийся барабан; 2 – неподвижная электромагнитная система; 3 – приёмный бункер; 4 – виброкаскадный питатель; 5 – аспирационный патрубок

жаются, свободно падая с барабана в свой приёмник (разгрузка через барабан). Немагнитные частицы движутся по виброкаскадному питателю 4 до его окончания и попадания в свой приёмник. Отсос пылевидных частиц осуществляется через аспирационный патрубок 5.

Сепараторы ЭБС-80/170 эксплуатировались на обогатительной фабрике Качканарского ГОКа для обогащения класса крупности  $-10+0$  мм мелкодроблёной руды и обеспечивали высокие результаты разделения. В дальнейшем их заменили на более производительные, надёжные (без виброкаскадного питателя) и экономичные сепараторы с системами из постоянных магнитов с верхней подачей материала.

### **Шкивные сепараторы**

Шкивные сепараторы применяются в основном для обогащения крупнодроблёной и среднедроблёной магнетитовой руды.

В шкивных сепараторах использована верхняя подача материала. Разделение материала в шкивных сепараторах осуществляется аналогично разделению в барабанных сепараторах. Особенностью шкивных сепараторов является подача исходного продукта на ленту, а не на барабан, что позволяет использовать более простые конструкции питателей или вообще отказаться от применения питателей.

На рис. 4.6, *а* приведена принципиальная конструкция шкивного сепаратора «Sala» типа «BSA» компании «Metso Minerals». На рис. 4.6, *б* приведена фотография сепаратора, на который поступает надрешётный продукт вибрационного грохота [76].

Сепаратор работает следующим образом. Исходный продукт подаётся на движущуюся ленту 4, охватывающую магнитный 1 и натяжной 3 барабаны. Магнитные частицы притягиваются к неподвижной магнитной системе 2 и транспортируются лентой до участка окончания магнитной системы, где магнитные частицы отрываются от ленты и попадают в свой приёмник. Немагнитные частицы отрываются от ленты раньше магнитных частиц и попадают в свой приёмник.

В сепараторах «Sala» модели «BS» используются магнитные системы из постоянных магнитов. В зависимости от крупности исходного материала применяется различное чередование полюсов. При крупности кусков до 300 мм полюса чередуются по длине барабана (см. рис. 4.2, *а*) – тип «BSS». При крупности кусков до 200 мм полюса чередуются по периметру обечайки барабана (по ходу движения материала) (см. рис. 4.2, *б*) – тип «BSA».

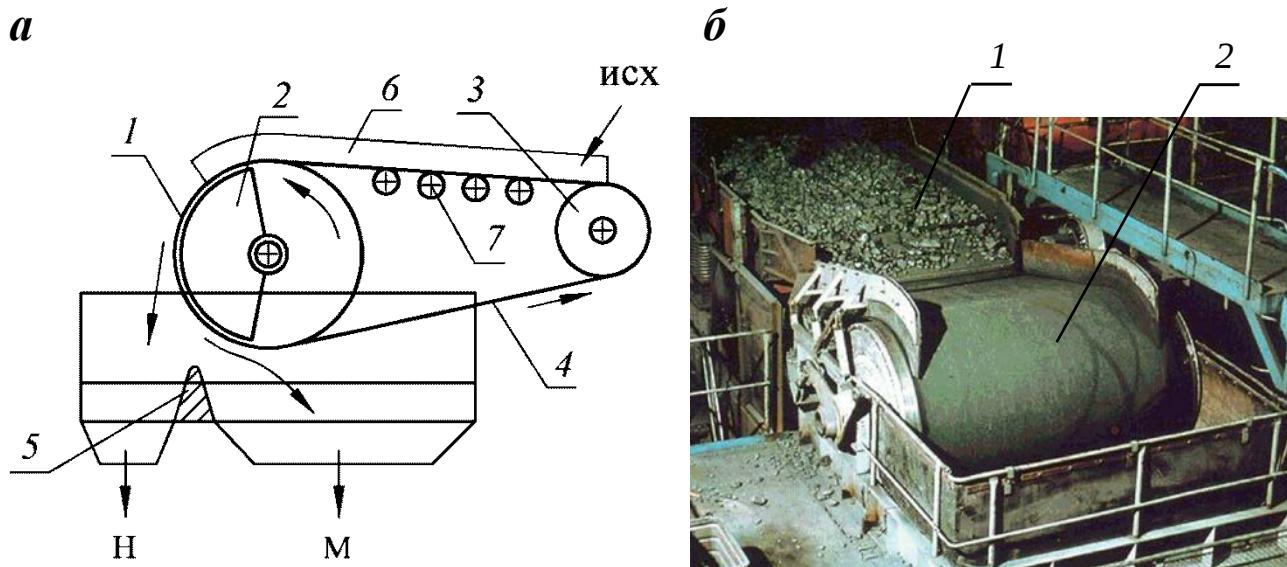


Рис. 4.6. Шкивный сепаратор «Sala» модели «BSA»:

*а* – принципиальная конструкция: 1 – вращающийся магнитный барабан; 2 – неподвижная магнитная система; 3 – натяжной барабан; 4 – бесконечная лента; 5 – делитель; 6 – боковые ограничители; 7 – поддерживающие ролики;

*б* – фотография сепаратора: 1 – вибрационный грохот; 2 – сепаратор

Магнитная система у шкивного сепаратора может быть круговой и вращаться вместе с барабаном, располагаясь по всему периметру обечайки последнего. В месте схода ленты с магнитного барабана осуществляется разгрузка магнитного продукта.

Основные характеристики шкивных сепараторов «Sala» компании «Metso Minerals» приведены в табл. 4.2 (данные взяты из официального каталога и с сайта компании [76]).

Таблица 4.2

Технические характеристики шкивных сепараторов «BS» для обогащения крупнокусковых сильномагнитных руд (диаметр магнитного барабана 1200 мм)

| Модель                             | Ширина ленты, мм                   | Мощность привода, кВт | Высота, мм      | Длина, мм | Ширина, мм                                                    | Масса, кг |         |
|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------|---------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|                                    |                                    |                       |                 |           |                                                               | тип BSA   | тип BSS |
| BS 1206                            | 600                                | 5,5                   | 2000            | 4360      | 1800                                                          | 2100      | 2400    |
| BS 1212                            | 1200                               | 7,5                   | 2000            | 4360      | 2400                                                          | 3800      | 4500    |
| BS 1218                            | 1800                               | 7,5                   | 2000            | 4360      | 3000                                                          | 5600      | 7700    |
| BS 1224                            | 2400                               | 7,7                   | 2000            | 4360      | 3600                                                          | 7450      | 8800    |
| BS 1230                            | 3000                               | 11,0                  | 2000            | 4360      | 4200                                                          | 9300      | 9900    |
| Характеристики типов «BSA» и «BSS» |                                    |                       |                 |           |                                                               |           |         |
| Тип                                | Максимальная крупность питания, мм |                       | Шаг полюсов, мм |           | Удельная производительность на один метр длины ленты, т/(ч·м) |           |         |
| BSA                                | 200                                |                       | 165; 250        |           | 150 – 250                                                     |           |         |
| BSS                                | 300                                |                       | 300             |           | 250 – 400                                                     |           |         |

Компания «НТЦ Магнис ЛТД» выпускает рудосортировочные комплексы с шкивными магнитными сепараторами для предварительного обогащения крупнодроблёной руды (0–350 мм), например, КМР-2/2 с производительностью 700 т/ч.

В России шкивные сепараторы не получили широкого распространения. Шкивные сепараторы выпускают ряд компаний, например «Эрга» (г. Калуга), «Магнетар» (г. Озёрск). Компания «Эрга» разработала сепаратор для обогащения крупнодроблёной руды.

#### **4.3. Железоотделители**

Железоотделители – аппараты, предназначенные для удаления железа из потока материала. При этом выделенное железо может быть как товарной продукцией, так и отходами.

Железоотделители можно разделить на четыре группы.

1. Барабанные.
2. Шкивные.
3. Подвесные с ручной разгрузкой извлечённых ферромагнитных тел.
4. Саморазгружающиеся подвесные.

Магнитная система железоотделителей может быть как электромагнитной, так и из постоянных магнитов. В настоящее время чаще используются системы из постоянных магнитов.

Железоотделители применяются:

а) для переработки вторичного сырья с целью извлечения ферромагнитных металлов (шлаки, кабельный и радиоэлектронный лом, стружка чёрных и цветных металлов, смешанный лом, твёрдые бытовые отходы и др.);

б) очистки немагнитных сыпучих материалов от магнитных примесей (концентраты неметаллических полезных ископаемых, отработанные формовочные пески литейного производства, цемент и др.);

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

##### *Барабанные железоотделители*

По своей конструкции барабанные железоотделители аналогичны конструкции барабанных магнитных сепараторов с верхней подачей материала для сухого обогащения. Поэтому принципы действия барабанного железоотделителя и барабанного сепаратора аналогичны.

Обычно барабанные железоотделители применяются, когда исходный материал транспортируется на участок готовой продукции или на участок упаковки самотёком по наклонной поверхности. В этом случае железоотделитель работает как сепаратор с верхней подачей материала. Реже барабанный железоотделитель устанавливается над лентой конвейера, по которому транспортируется исходный материал. В этом случае железоотделитель работает как сепаратор с нижней подачей материала.

### *Шкивные железоотделители*

По своей конструкции шкивные железоотделители аналогичны конструкции шкивных магнитных сепараторов для сухого обогащения. Отличие заключается в том, что шкивной железоотделитель представляет собой ведущий (реже – ведомый) барабан ленточного конвейера, по которому транспортируется исходный материал. Ведущий барабан такого конвейера называется магнитным барабаном, так как внутри него установлена магнитная система (рис. 4.7, а).

К электромагнитным шкивным железоотделителям относятся железоотделители типа ШЭ, ЭШ или ЖШ с электромагнитной системой («Ш» – шкивной, «Э» – электромагнитная система, «Ж» – железотделитель). В настоящее время чаще применяются шкивные железоотделители с системой из постоянных магнитов. Цифра в обозначении шкивных железоотделителей указывает на ширину ленты конвейера (до 200 см).

### *Подвесные железоотделители с ручной разгрузкой ферромагнитных тел*

Эти аппараты применяются при небольшой доле в исходном продукте ферромагнитных частиц (железа). Подвесные железоотделители с ручной разгрузкой ферромагнитных тел устанавливают над конвейером, по которому транспортируется исходный материал.

К подвесным железоотделителям с ручной разгрузкой ферромагнитных тел относятся аппараты П-образного типа П160 или ПЭ-200 или ЭЖ-100 («П» – подвесной, «Э» – электромагнитная система, «Ж» – железоотделитель) и другие. Цифра в обозначении указывает на ширину ленты конвейера. Особенностью этих железоотделителей является высокий полюсный шаг, достигающий одного метра. Благодаря этому удаётся создать магнитное поле с высокой индукцией на значительном расстоянии от полюсов магнитной системы (глубина зоны извлечения до 650 мм). Масса удаляемых ферромагнитных тел до 40 кг.

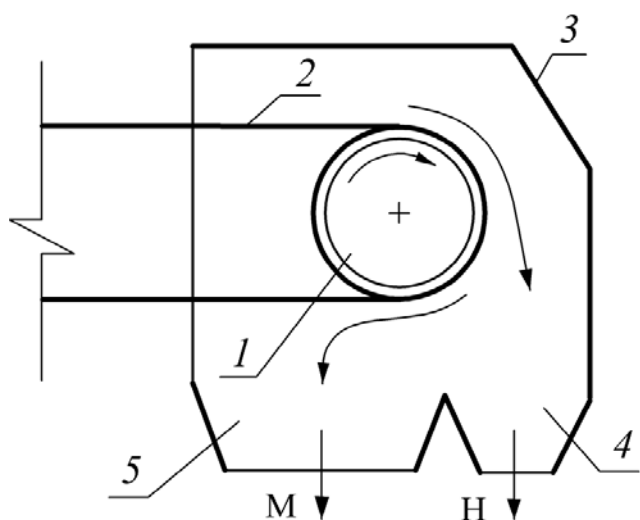
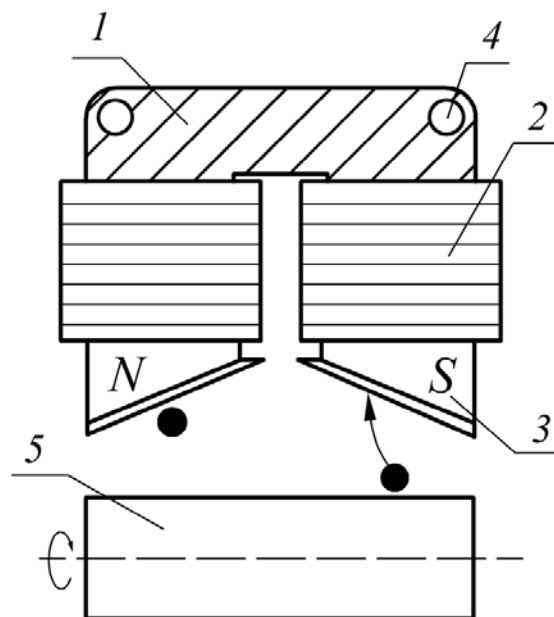
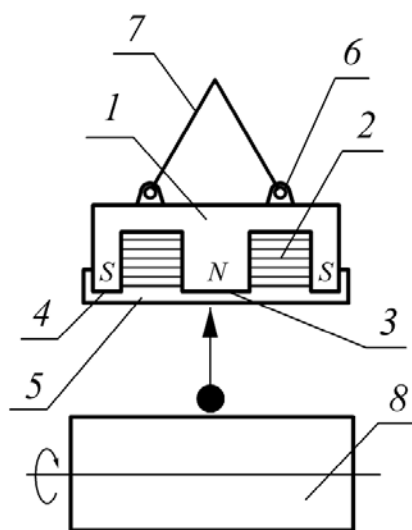
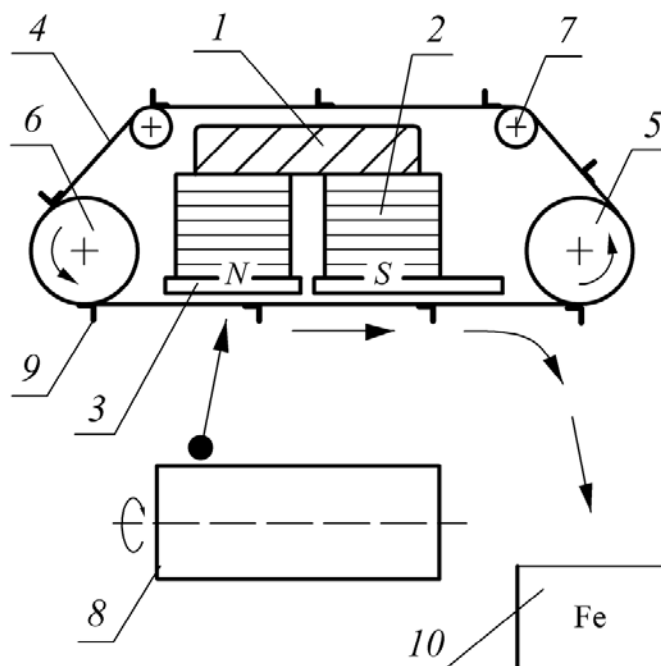
***a******б******в******г***

Рис. 4.7. Железоотделители:

*a* – шкивной: 1 – магнитный приводной барабан; 2 – лента конвейера; 3 – укрытие; 4, 5 – приёмники для обезжелезенного продукта и для ферромагнитного продукта;  
*б* – подвесной с ручной разгрузкой ферромагнитных тел: 1 – магнитопровод; 2 – обмотки возбуждения; 3 – полюсные наконечники; 4 – монтажные отверстия; 5 – конвейер; *в* – круглый электромагнит: 1 – магнитопровод; 2 – обмотка возбуждения; 3 – центральный круглый полюс; 4 – наружный кольцеобразный полюс; 5 – немагнитная футеровка (диск); 6 – монтажные отверстия; 7 – цепь; 8 – конвейер; *г* – подвесной саморазгружающийся: 1 – магнитопровод; 2 – обмотка возбуждения; 3 – полюсные наконечники; 4 – бесконечная лента; 5 – приводной барабан; 6 – натяжной барабан; 7 – направляющие ролики; 8 – конвейер; 9 – рёбра; 10 – ёмкость для ферромагнитного продукта

Эти аппараты имеют двухполюсную магнитную систему, состоящую из магнитопровода 1, обмоток возбуждения 2 и полюсных наконечников 3 (рис.4.7, б). 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 магнитный продукт разгружается в специальную емкость. Наиболее эффективным режимом работы является кратковременный, когда железоотделитель включается от сигнала металлоискателя.

К подвесным железоотделителям с ручной разгрузкой ферромагнитных тел также относится круглый электромагнит, который часто называют электромагнитной шайбой (рис.4.7, в). Принцип работы круглого электромагнита аналогичен принципу работы П-образного электромагнита. Он также подвешивается над конвейером и используется для извлечения ферромагнитных тел из движущегося потока материала.

На обогатительных фабриках круглые электромагниты также используются в качестве грузоподъемного оборудования для захвата и перемещения ферромагнитных тел (детали, шары мельниц, металлолом и др.) с помощью кранового механизма.

#### *Саморазгружающиеся подвесные железоотделители*

При большом количестве ферромагнитных тел в исходном продукте применяются подвесные ленточные саморазгружающиеся железоотделители.

К ним относятся электромагнитные железоотделители типа ПС-160, ПЭС-200, ЭЖС-200 (цифра в обозначении аппарата соответствует ширине ленты конвейера в сантиметрах, «П» – подвесной, «С» – саморазгружающийся, «Э» – электромагнитная система, «Ж» – железоотделитель) и другие. Как правило, эти аппараты имеют двухполюсную магнитную систему, состоящую из магнитопровода 1, обмоток возбуждения 2 и полюсных наконечников 3 (рис. 4.7, г). Глубина зоны извлечения достигает 650 мм. Масса удаляемых ферромагнитных тел до 40 кг.

Магнитная система подвесных железоотделителей может быть из постоянных магнитов (см. рис. 2.1, б). Подвесные железоотделители с системой из постоянных магнитов более компактны, не требуют расхода электроэнергии для питания обмотки электромагнита, но обладают меньшими извлекающими способностями.

Подвесные саморазгружающиеся железоотделители состоят из транспортера, включающего ведущий 5 и ведомый 6 барабаны, вокруг которых перемещается бесконечная лента 4. Между внутренними поверхностями ленты максимально близко к нижней ее ветви (между ведущим и ведомым барабанами) расположена магнитная система (поз. 1, 2, 3). Ферромагнитные тела извлекаются из потока материала, движущегося по конвейеру 8, притягиваются к магнитной системе и транспортируются лентой до участка окончания магнитной системы, после чего отрываются от ленты и падают в ёмкость 10. Для лучшей разгрузки ферромагнитных тел на ленте установлены рёбра 9. Привод 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 (чаще поперёк направлению перемещения материала). Установка железоотделителя должна предусматривать регулировку высоты подвески над лентой конвейера. Для лучшего извлечения ферромагнитных предметов из транспортируемого материала рекомендуется, чтобы лента конвейера под железоотделителем была плоской, что достигается установкой прямых роликоопор конвейера на некотором расстоянии до и после зоны действия магнитного поля железоотделителя.

Подвесные ленточные саморазгружающиеся железоотделители можно устанавливать над разгрузочным (ведущим) барабаном транспортирующего конвейера по направлению перемещения материала. Транспортируемый материал под железоотделителем по такой схеме установки находится в разрыхленном состоянии и оказывает минимальное сопротивление при извлечении ферромагнитных предметов.

Для полного извлечения ферромагнитных тел при большом их количестве в исходном продукте, транспортируемом конвейером, одновременно применяют два типа железоотделителей – подвесной саморазгружающийся и шкивной. Подвесной саморазгружающийся железоотделитель применяют для извлечения и удаления ферромагнитных предметов, находящихся в верхней части слоя материала, а шкивной железоотделитель – для извлечения и удаления ферромагнитных предметов, находящихся в нижней части слоя материала, транспортируемого конвейером.

#### **4.4. Сепараторы со слабым магнитным полем для мокрого обогащения сильномагнитных руд**

К этой группе аппаратов относят барабанные сепараторы типа ПБМ и ЭБМ. До середины XX века применяли ленточные сепараторы, которые в настоящее время полностью заменили барабанные сепараторы.

Способ подачи материала – нижний. Барабанные сепараторы с нижней подачей материала имеют общую принципиальную конструкцию, в них реализуется способ разделения за счёт извлечения магнитных частиц из движущегося в ванне потока пульпы и их последующего транспортирования в зону разгрузки (см. рис. 1.1, б).

По виду разделяемого продукта сепараторы подразделяют на аппараты для обогащения измельчённых магнетитовых руд и регенерации тяжелосредних суспензий.

Разделение осуществляется в водной среде, поэтому крупность исходного продукта не превышает 6 мм (обычно меньше 3 мм). Барабанные сепараторы для обогащения руд имеют, как правило, магнитную систему из постоянных магнитов с чередованием полярности по периметру обечайки барабана (по ходу движения материала). Магнитная система сепараторов для регенерации тяжелосредних суспензий чаще электромагнитная секторная с чередованием полярности полюсов по длине барабана.

##### *Барабанные сепараторы для обогащения руд*

В России основным производителем барабанных сепараторов для мокрого обогащения является завод «Рудгормаш» (г. Воронеж). Сепараторы также выпускают компании «Механобр-техника» (г. С-Петербург), «Эрга» (г. Калуга), «Магнетар» (г. Озёрск). Технические характеристики основных барабанных сепараторов завода «Рудгормаш» приведены в табл. 4.3 (данные взяты из официального каталога и с сайта завода [75]).

Магнитные системы сепараторов изготовлены из постоянных магнитов из феррита бария. Сепараторы могут выпускаться в исполнении «А» с магнитной системой их постоянных магнитов из Nd-Fe-B ( $B=0,24$  Тл). Выпускаются сепараторы ПБМ-ППЦ-90/250 с регулируемой циркуляцией магнитного продукта («Ц» – циркуляция). В сепараторе ПБМ-ППЦ для повышения массовой доли железа в концентрате часть магнитного продукта направляется обратно в ванну для дообогащения.

Таблица 4.3

**Основные технические характеристики барабанных сепараторов  
для мокрого обогащения сильномагнитных руд**

| Сепаратор      | Крупность питания, мм | Производительность, т/ч | Индукция на поверхности барабана, Тл | Мощность привода, кВт | Масса, кг | Габаритные размеры, мм |
|----------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------|------------------------|
| ПБМ-90/250     | 0 – 6                 | 105 – 160               | 0,16                                 | 4,0                   | 4000      | 3300x2100x2200         |
| ПБМ-П-90/250   | 0 – 3                 | 100 – 160               | 0,16                                 | 4,0                   | 4000      | 3300x2100x2200         |
| ПБМ-ПП-90/250  | 0 – 1                 | 105 – 160               | 0,16                                 | 4,0                   | 4000      | 3300x2100x2200         |
| ПБМ-П-120/300  | 0 – 3                 | 200                     | 0,16                                 | 7,5                   | 7000      | 4000x2700x2600         |
| ПБМ-ПП-120/300 | 0 – 1                 | 120                     | 0,16                                 | 7,5                   | 7000      | 4000x2700x2600         |
| ПБМ-П-150/200  | 0 – 3                 | 250                     | 0,16                                 | 7,5                   | 6000      | 3000x2700x2600         |
| ПБМ-ПП-150/200 | 0 – 1                 | 250                     | 0,16                                 | 7,5                   | 6000      | 3000x2700x2600         |

Производительность сепараторов приведена максимальная (пропускная). Реальная (технологическая) производительность сепаратора, как правило, ниже, например, на обогатительной фабрике Качканарского ГОКа производительность сепараторов ПБМ-П-150/200 составляет соответственно 130 и 100 т/ч в I и II стадиях, а производительность сепараторов ПБМ-ПП-150/200 не превышает 50 т/ч в III и IV стадиях.

Барабанные сепараторы для обогащения руд ПБМ изготавливаются трёх типов: прямоточные, противоточные и полупротивоточные. Они отличаются типом ванн и направлением движения продуктов (рис. 4.8, а – в).

Сепараторы завода «Рудгормаш» имеют три размера барабана (см. табл. 4.3). Разработаны сепараторы с длиной барабана 4000 мм (ПБМ-150/400). В России они не получили применения и не выпускаются. Сепараторы такого типоразмера выпускают в Китае (например, сепаратор СТВ-1540, компания «Huate» [77]).

Производительность сепаратора зависит не только от длины барабана, но и от его диаметра. Чем больше диаметр барабана, тем выше индукция магнитного поля на дне ванны сепаратора, так как меньше коэффициент неоднородности магнитного поля (см. формулу (2.28)). Рабочая зона разделения сепаратора тем длиннее, чем больше диаметр барабана. Поэтому сепараторы с диаметром барабана 1500 мм имеют более высокую удельную производительность (на 1 м длины барабана) по сравнению с сепараторами с длиной барабана 900 и 1200 мм и обеспечивают получение хвостов с более низким значением массовой доли железа магнетитового.

Кроме этого, магнитная система сепараторов ПБМ-150/200 имеет большее количество полюсов, по сравнению с другими сепараторами (у ПБМ-

150/200 – 14 шт., у ПБМ-120/300 – 10 шт., у ПБМ-90/250 – 8 шт.). Этим обеспечивается большее число переориентаций магнетитовых прядей и флокул при их переходе с полюса одной полярности на полюс другой полярности, что приводит к повышению массовой доли железа в магнитном продукте.

Прямоточный сепаратор работает следующим образом (рис. 4.8, а). Измельчённая руда в виде пульпы поступает из приёмного короба 1 в ванну 6 под вращающийся барабан 3. Магнитные частицы извлекаются из пульпы, притягиваются к поверхности барабана и транспортируются им до места окончания магнитной системы 4, где магнитные частицы смываются с поверхности барабана водой, подаваемой из смывного устройства 5. Немагнитные частицы разгружаются через отверстие в нижней части ванны. Направление вращения барабана совпадает с направлением движения пульпы.

В приёмном коробе всех типов сепараторов устанавливают обойную плиту 2 для предотвращения износа короба. На выходе пульпы из приёмного короба прямоточных и противоточных сепараторов могут устанавливаться флокуляторы 7, представляющие собой плоскую магнитную систему из постоянных магнитов. Флокуляторы применяют для предварительного намагничивания сильномагнитных частиц при их низкой массовой доле в обогащаемом продукте (для создания флокул).

В противоточных сепараторах исходный материал движется навстречу направлению вращения барабана. В остальном процесс разделения аналогичен процессу разделения в прямоточном сепараторе. Особенностью конструкции противоточного сепаратора является подача исходной пульпы из короба 1 в ванну 6 по трубкам 8 и разгрузка магнитного продукта через зазоры между трубками 8. Кроме этого, в правой части ванны напротив крайнего полюса имеется переливное отверстие для поддержания постоянного уровня пульпы в ванне (рис. 4.8, б).

В полупротивоточных сепараторах пульпа исходного продукта поступает к барабану снизу вверх под давлением. Магнитные частицы притягиваются к магнитной системе и транспортируются барабаном к месту разгрузки в правую часть ванны. Немагнитные частицы и вода движутся в левую часть ванны и разгружаются самотёком, так как левый порог ванны ниже, чем правый (рис. 4.8, в).

В сепараторах ПБМ-ПП-120/300 и ПБМ-ПП-150/200 напротив зоны транспортировки магнитного продукта к месту разгрузки на дне ванны установлено устройство, подающее под давлением воду на барабан для промывки

извлечённых частиц магнетита с целью удаления из магнетитовых прядей и флокул породных частиц и бедных флокул.

Положение магнитной системы (угол её поворота) можно регулировать. Рабочее положение магнитной системы строго определённое для разных типов сепараторов. Барабаны одного типоразмера можно использовать с разными типами ванн.

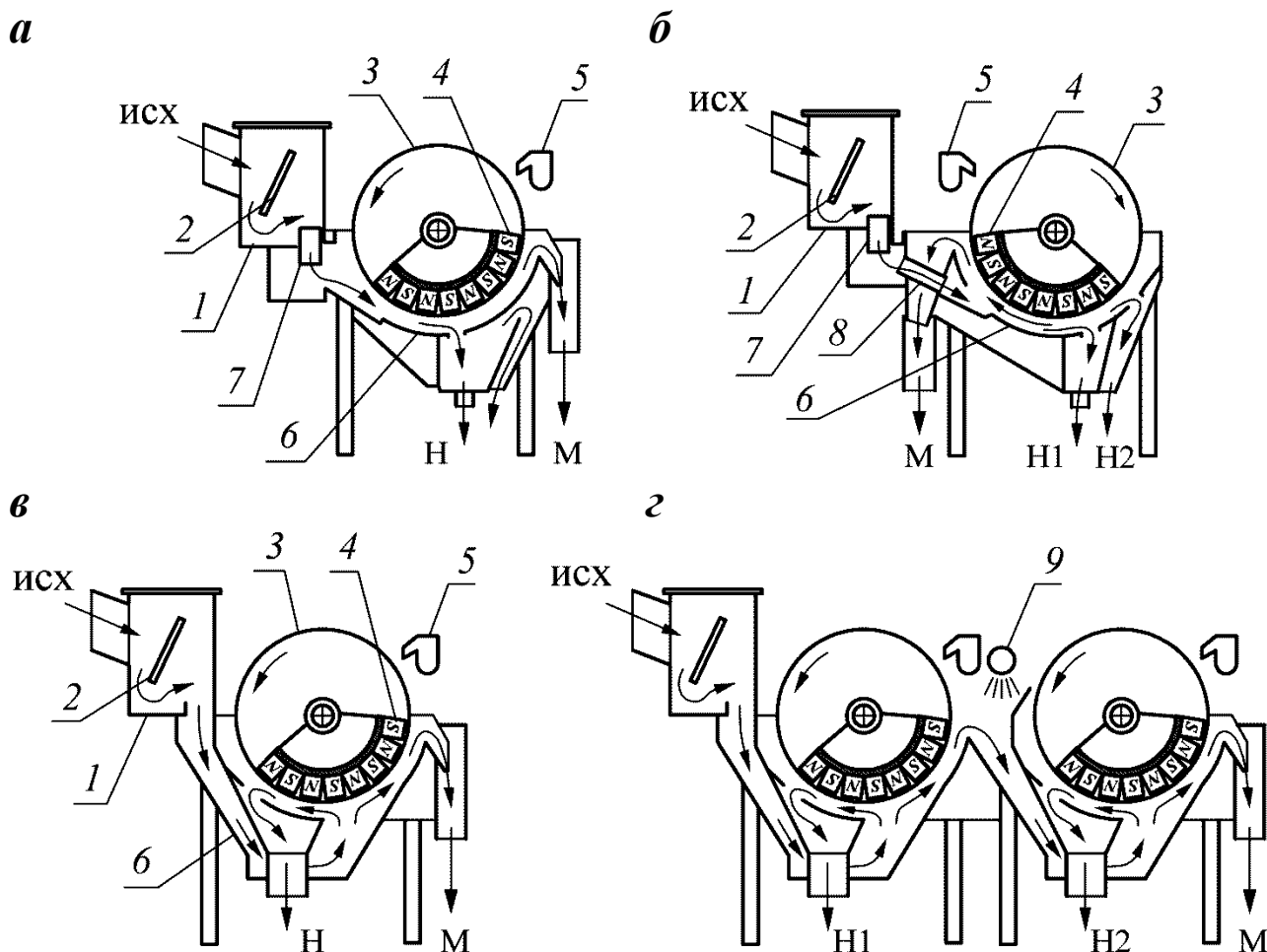


Рис. 4.8. Барабанные сепараторы для мокрого обогащения сильномагнитных руд:  
 а – прямоточный ПБМ-90/250; б – противоточный ПБМ-П-90/250; в – полупротивоточный ПБМ-ПП-90/250; г – двухбарабанный сепаратор 2ПБМ-ПП-90/250:  
 1 – приёмный короб; 2 – отбойник; 3 – барабан; 4 – магнитная система; 5 – смывное устройство; 6 – ванна; 7 – флокулятор; 8 – трубки; 9 – устройство для подачи дополнительной воды;  
 М – магнитный; Н – немагнитный

Прямоточные сепараторы применяются в первых операциях схем магнитного обогащения при крупности исходного продукта менее 6 мм. Противоточные сепараторы также применяются в первых операциях схем магнитного обогащения при крупности исходного продукта менее 3 мм. Полупротивоточные сепараторы применяются в последних операциях схем магнитного обога-

щения при крупности исходного продукта менее 1 мм (более 50 % класса –71 мкм). В полупротивоточных сепараторах исходный материал (пульпа) подаётся под барабан через специальный канал в нижней части ванны под давлением. Поэтому в питании сепаратора не должно быть крупных частиц, которые могут осесть на дне канала.

Прямоточные и полупротивоточные сепараторы могут компоноваться в многобарабанные сепараторы для осуществления пересортировки магнитного продукта с целью повышения его качества. На рис. 4.8, з показан двухбарабанный сепаратор, включающий два сепаратора ПБМ-ПП-90/250, скомпонованных на одном уровне. В этом случае для подачи дополнительной воды в ванну второго сепаратора используется устройство 9.

#### *Барабанные сепараторы для регенерации тяжелосредной суспензии*

На гравитационных обогатительных фабриках с тяжелосредным обогащением в основном используются суспензии на основе воды и мелких частиц магнетита и ферросилиция. Продукты гравитационного разделения поступают на грохоты для отмывки суспензии. Отработанная суспензия поступает на магнитные (регенерационные) сепараторы для извлечения утяжелителя (магнетита и ферросилиция) и сгущения суспензии.

Для регенерации тяжёлосредных суспензий применяются противоточные сепараторы с электромагнитными системами и с системами из постоянных магнитов. Технические характеристики основных барабанных сепараторов завода «Рудгормаш» приведены в табл. 4.4 (данные взяты из официального каталога и с сайта завода [75]).

Таблица 4.4

#### Основные технические характеристики барабанных сепараторов для регенерации тяжелосредных суспензий из магнетита и ферросилиция

| Сепаратор                                    | Производительность, м <sup>3</sup> /ч | Индукция на поверхности барабана, Тл | Мощность, кВт            |         | Масса, кг | Габаритные размеры, мм |
|----------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------|-----------|------------------------|
|                                              |                                       |                                      | электромагнитной системы | привода |           |                        |
| Сепараторы с электромагнитной системой       |                                       |                                      |                          |         |           |                        |
| ЭБМ-П-80/170                                 | 270                                   | 0,264                                | 18                       | 3       | 5500      | 3100x2100x2200         |
| ЭБМ-П-90/250                                 | 400                                   | 0,264                                | 28                       | 3       | 8500      | 3900x2300x2200         |
| Сепараторы с системой из постоянных магнитов |                                       |                                      |                          |         |           |                        |
| ПБР-П-80/170                                 | 150                                   | 0,14                                 | -                        | 3       | 4300      | 3100x2000x2300         |
| ПБР-П-80/170А                                | 250                                   | 0,24                                 | -                        | 5,5     | 4300      | 3100x2000x2300         |
| ПБР-П-90/250                                 | 220                                   | 0,15                                 | -                        | 3       | 5700      | 3800x2200x2100         |
| ПБР-П-90/250А                                | 370                                   | 0,24                                 | -                        | 5,5     | 5700      | 3800x2200x2100         |

Буква «Р» в обозначении сепаратора – регенерационный. Буква «А» в обозначении сепаратора указывает на повышенную индукцию магнитного поля сепаратора (использование магнитов из Nd-Fe-B). Производительность сепараторов приведена максимальная.

К регенерационным сепараторам предъявляются следующие требования: эффективная работа на весьма разбавленных пульпах при высокой объёмной производительности; максимальное извлечение частиц утяжелителя (98 % и более); получение чистой и плотной магнитной фракции (не ниже 2000 кг/м<sup>3</sup>).

Противоточные сепараторы для регенерации суспензии значительно отличаются от противоточных сепараторов для обогащения руд.

Сепаратор для регенерации суспензий по сравнению с сепараторами ПБМ для обогащения руд имеет следующие особенности (рис. 4.9):.

1. Повышенная индукция магнитного поля.
2. Увеличенная длина рабочей зоны – сектор магнитной системы более 180°, барабан погружён в пульпу ниже своей оси.
3. Наличие отжимного скребка для обезвоживания магнитного продукта (до 85 % твёрдого).
4. Разгрузка магнитного продукта через верхнюю часть барабана.

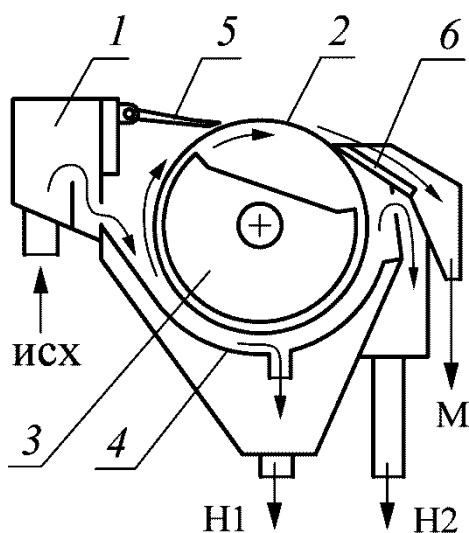


Рис. 4.9. Сепаратор ЭБМ-П-80/170:  
1 – приёмный короб; 2 – барабан; 3 – электромагнитная система; 4 – ванна; 5 и 6 – отжимной и счищающий скребки

Сепаратор ЭБМ-П работает следующим образом. Исходная тяжелосредная суспензия подаётся в приёмный короб 1, откуда она попадает в ванну 4. По мере движения пульпы под вращающимся барабаном 2 из неё извлекаются магнитные частицы утяжелителя и притягиваются к неподвижной электромагнитной системе 3. Магнитные частицы поднимаются барабаном вверх, проходят под отжимным скребком 5 (обезвоживаются) и снимаются на противоположной стороне барабана счищающим скребком 6 и попадают в приёмник утяжелителя. Направление вращения барабана противоположно направлению движения исходного продукта.

Немагнитный продукт в ванне сепаратора делится на относительно крупные немагнитные частицы (Н1) и слив (Н2). Первый разгружается в нижней ча-

сти ванны и направляется на дальнейшую переработку, второй разгружается через порог ванны и направляется в качестве оборотной воды на отмывку суспензии из продуктов тяжелосредной сепарации (см. рис. 4.9).

*Барабанные сепараторы с переменным магнитным полем для повышения качества магнетитового концентрата*

Барабанные магнитные сепараторы ПБМ спроектированы для извлечения не только чистых зёрен магнетита, но всех сростков (богатых и бедных). Назначением сепараторов ПБМ является получение «чистых» хвостов при максимальном извлечении магнетита (более 95 % в целом по обогатительной фабрике). Готовый концентрат получают после последней стадии обогащения, когда породные минералы больше не выводятся в хвосты.

В готовых концентратах и промпродуктах, полученных с помощью сепараторов ПБМ, содержатся породные частицы и бедные сростки, извлечённые в магнитный продукт за счёт флокуляции. В стандартных сепараторах ПБМ с чередованием полярности полюсов по ходу движения материала (см. рис. 4.2, б) возникает переменное магнитное поле с низкой частотой (менее 10 Гц). Такой величины частоты недостаточно для разрушения магнетитовых флокул и для удаления из них породных частиц и бедных сростков.

Для повышения качества магнетитовых концентратов и для выделения части готового концентрата перед последней стадией измельчения разработаны сепараторы с повышенной частотой смены полярности полюсов по ходу движения материала (обогащение в переменном магнитном поле).

Это достигается при использовании вращающейся магнитной системы (создание бегущего магнитного поля) относительно неподвижного или медленно вращающегося барабана [19, 21, 35, 45, 52] или путём использования неподвижной магнитной системы с изменяющейся величиной индукции магнитного поля и пониженным и изменяющимся шагом полюсов по ходу движения материала [48]. Повышение частоты переменного магнитного поля можно также достичь путём увеличения линейной скорости вращения барабана относительно неподвижной магнитной системы. Переменное магнитное поле можно создать при помощи электромагнитной системы, питаемой переменным током.

Частота переменного магнитного поля в разработанных сепараторах достигает 200 Гц. При попадании магнитной пряди или флокулы в переменное магнитное поле повышенной частоты она разрушается, что позволяет выделить сростки и мелкие немагнитные частицы, содержащиеся в магнитной пряди, в

немагнитный продукт. В результате этого качество концентрата повышается по сравнению с традиционными барабанными сепараторами ПБМ.

Сепарацию в бегущем магнитном поле осуществляют как в воздушной среде, так и в водной.

На рис. 4.10, *а* приведён общий вид лабораторного барабанного сепаратора с бегущим магнитным полем с нижней подачей материала конструкции Уральского государственного горного университета.

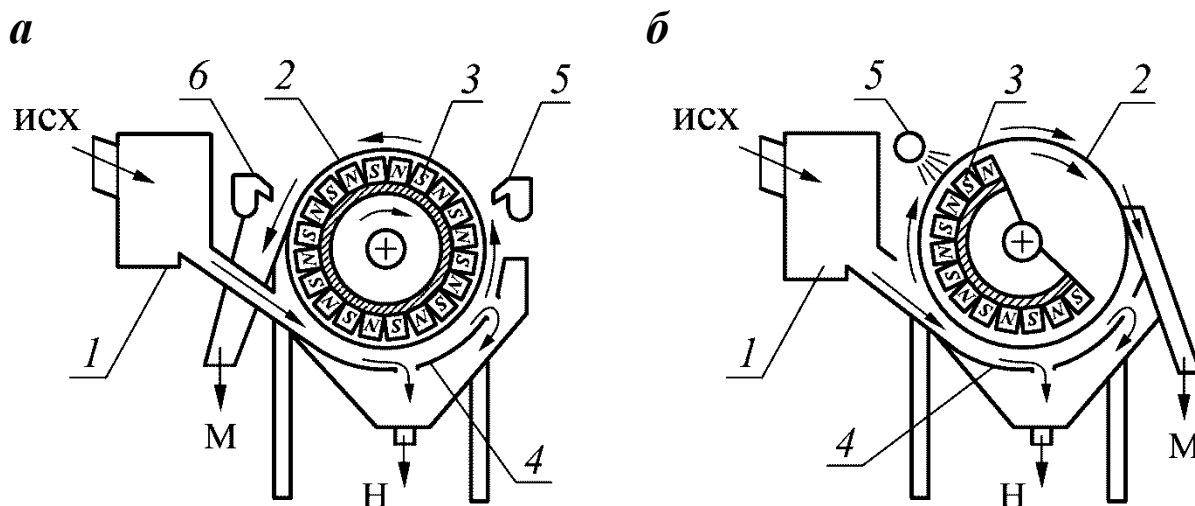


Рис. 4.10. Барабанные сепараторы для мокрого обогащения сильномагнитных руд в переменном магнитном поле:

*а* – сепаратор с вращающейся магнитной системой:

1 – приёмный короб; 2 – неподвижный барабан; 3 – вращающаяся магнитная система; 4 – ванна; 5 – устройство для подачи промывной воды; 6 – устройство для подачи смывной воды;

*б* – сепаратор с повышенной частотой вращения барабана:

1 – приёмный короб; 2 – вращающийся барабан; 3 – неподвижная магнитная система; 4 – ванна; 5 – устройство для подачи промывной воды

Сепаратор состоит из неподвижного барабана 2, внутри которого вращается магнитная система 3 с чередованием полярности полюсов по образующей барабана. Линейная 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 пряди 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. Для разгрузки магнитного продукта с поверхности барабана применяют конструкцию, позволя-

ющую обеспечить постепенное удаление магнитной системы от поверхности барабана, или индукционные съёмники.

В табл. 4.5 приведены результаты опытов по повышению качества железных концентратов с помощью лабораторного сепаратора с бегущим магнитным полем конструкции Уральского государственного горного университета.

Таблица 4.5

Результаты опытов по повышению качества рядовых железных концентратов

| Продукт                                                                                | Выход, % | Массовая доля Fe, % | Извлечение Fe, % |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------------|------------------|
| <i>Сепаратор с вращающейся магнитной системой (сепарация в бегущем магнитном поле)</i> |          |                     |                  |
| Магнетитовая руда Высокогорского месторождения                                         |          |                     |                  |
| Магнитный                                                                              | 79,1     | 66,62               | 83,17            |
| Немагнитный                                                                            | 20,9     | 51,03               | 16,83            |
| Концентрат (69 % кл.-71 мкм)                                                           | 100,0    | 63,36               | 100,00           |
| Титаномагнетитовая руда Гусевгорского месторождения (концентрат для окомкования)       |          |                     |                  |
| Магнитный                                                                              | 32,1     | 65,50               | 33,69            |
| Немагнитный                                                                            | 67,9     | 61,08               | 66,31            |
| Концентрат (92 % кл.-71 мкм)                                                           | 100,0    | 62,50               | 100,00           |
| Железистые кварциты Сутарского месторождения                                           |          |                     |                  |
| Магнитный                                                                              | 79,7     | 66,80               | 82,50            |
| Немагнитный                                                                            | 20,3     | 55,49               | 17,50            |
| Концентрат (96 % кл.-45 мкм)                                                           | 100,0    | 64,50               | 100,00           |
| Железистые кварциты Сутарского месторождения (схема с доизмельчением)                  |          |                     |                  |
| Магнитный                                                                              | 70,6     | 69,90               | 76,46            |
| Немагнитный                                                                            | 29,4     | 51,56               | 23,54            |
| Концентрат (99,7 % кл.-45 мкм)                                                         | 100,0    | 64,50               | 100,00           |
| <i>Сепаратор с повышенной частотой вращения барабана</i>                               |          |                     |                  |
| Титаномагнетитовая руда Гусевгорского месторождения (концентрат для агломерации)       |          |                     |                  |
| Магнитный                                                                              | 85,2     | 62,4                | 87,17            |
| Немагнитный                                                                            | 14,8     | 52,93               | 12,83            |
| Концентрат (87,3 % кл.-71 мкм)                                                         | 100,0    | 61,00               | 100,00           |
| Титаномагнетитовая руда Гусевгорского месторождения (концентрат для окомкования)       |          |                     |                  |
| Магнитный                                                                              | 87,5     | 63,7                | 88,51            |
| Немагнитный                                                                            | 13,5     | 58,09               | 11,49            |
| Концентрат (93 % кл.-71 мкм)                                                           | 100,0    | 63,00               | 100,00           |

Сепарация в бегущем магнитным поле позволила повысить массовую долю железа в концентрате на 2-4 %. Использование схемы с доизмельчением концентрата позволяет получать высококачественные магнетитовые концентраты с содержанием железа до 70 % за счёт разрушения прядей и флокул.

На рис. 4.10, б приведён общий вид барабанного противоточного сепаратора с повышенной частотой вращения барабана и с промывкой извлечённого магнитного продукта. Сепараторы такой конструкции выпускает компания «Huate» (Китай) [77]. Исходная пульпа подаётся в приёмный короб 1, откуда она попадает в ванну 4. По мере движения пульпы под вращающимся бараба-

ном 2 из неё извлекаются магнитные частицы и притягиваются к неподвижной магнитной системе 3. За счёт повышенной частоты вращения барабана часть породных частиц и бедных сростков удаляются в немагнитный продукт. Далее магнитные частицы поднимаются барабаном вверх, из устройства 5 подаётся вода для их промывки и удаления из магнетитовых флокулов породных частиц и бедных сростков. Разгрузка магнитных частиц осуществляется на противоположной стороне барабана. Сектор магнитной системы сепаратора более  $180^{\circ}$ .

Результаты опытов по повышению качества железных концентратов с помощью лабораторного сепаратора 120Т-СЭМ с изменениями согласно конструкции, приведённой на рис. 4.10, б (без промывки магнитного продукта), приведены в табл. 4.5. Обогащение в сепараторе с повышенной частотой вращения барабана (без промывки извлечённого магнитного продукта) позволило повысить массовую долю железа в концентрате на 1-2 %.

Немагнитные продукты во всех опытах содержат большое количество железа (больше 50 %) и не являются отвальными продуктами. Обогащение немагнитных продуктов по схеме с доизмельчением и магнитной сепарацией в стандартных сепараторах типа ПБМ позволяет получить рядовой концентрат (см. табл. 4.5).

#### **4.5. Валковые сепараторы с сильным магнитным полем для обогащения слабомагнитных руд**

Валковые сепараторы с сильным магнитным полем можно разделить на две группы.

1. Валковые сепараторы с замкнутой электромагнитной системой.
2. Валковые сепараторы с открытой зоной разделения с магнитной системой из постоянных редкоземельных магнитов (Nd-Fe-B).

*Основное применение* валковых сепараторов – обогащение слабомагнитных минералов и обезжелезивание неметаллических полезных ископаемых (кварц, полевой шпат и др.), 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.

##### **Валковые сепараторы с замкнутой электромагнитной системой**

К этой группе аппаратов относятся валковые сепараторы типа ЭВС и ЭВМ для сухого и мокрого обогащения. Известны конструкции дисковых сепараторов

раторов [12, 13], которые по принципу разделения также можно отнести к сепараторам рассматриваемой группы, но в настоящее время дисковые сепараторы 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 (менее 5 мм) и длину рабочей зоны (трудность создания сильного поля в большом объеме) и, как следствие, снижает производительность валковых сепараторов, которая меньше, чем у барабанных сепараторов с открытой зоной разделения. Способ подачи исходного продукта в основном нижний.

Валковые сепараторы имеют замкнутую электромагнитную систему с замыканием магнитных силовых линий через индукционный валок (см. рис. 2.4). Валок сепаратора имеет выступы прямоугольного или треугольного сечения, чем достигается повышение неоднородности и силы магнитного поля на выступе, по сравнению с противолежащим плоским или вогнутым полюсом желобчатого сечения (см. рис. 2.5). В результате этого слабомагнитные частицы притягиваются к выступам вала (на выступах максимальная магнитная сила) и выносятся валком в приёмник магнитной фракции.

Технические характеристики валковых сепараторов завода «Рудгормаш» (Воронеж) приведены в табл. 4.6 [75]. Валковые сепараторы также выпускает компания «Механобр-техника» (г. С-Петербург).

Таблица 4.6

Основные технические характеристики валковых сепараторов с замкнутой электромагнитной системой

| Характеристики                                      | Сепаратор |           |             |                |                                  |
|-----------------------------------------------------|-----------|-----------|-------------|----------------|----------------------------------|
|                                                     | ЭВС-28/9  | ЭВС-36/50 | 2ЭВС-36/100 | 2ЭВМ-40/250А32 | 4ЭВМ-40/250А<br>(4ЭВМ-40/250А32) |
| Производительность, т/ч                             | 0,3-0,5   | 1,5-3     | 6-12        | 16             | 25-27                            |
| Крупность, мм                                       | 0,1-4,0   | 0,1-4,0   | 0,1-4,0     | 0,1-4,0        | 0,1-1,0 (0,1-4,0)                |
| Индукция, Тл                                        | 1,7       | 1,7       | 1,65        | 1,4-2,0        | 1,4                              |
| Диаметр вала, мм                                    | 280       | 360       | 360         | 380            | 380                              |
| Длина вала, мм                                      | 90        | 500       | 1000        | 2700           | 2700                             |
| Шаг зубцов, мм                                      | н.д.      | н.д.      | н.д.        | 32             | 16 (32)                          |
| Мощность привода, кВт                               | 2,2       | 7,5       | 22          | 30             | 4 x 11                           |
| Потребляемая мощность электромагнитной системы, кВт | 0,8       | 1,8       | 8           | 12             | 14                               |
| Масса, кг                                           | 1000      | 4000      | 8800        | 23000          | 43000                            |

Производительность сепараторов приведена максимальная при обогащении продуктов с высоким содержанием «тяжёлых» минералов. При низком содержании в питании «тяжёлых» минералов или при обезжелезивании неметаллических полезных ископаемых (например, кварца) производительность значительно снижается.

На рис. 4.11 приведена принципиальная конструкция сепаратора 2ЭВС-36/100. Сепаратор предназначен для сухого обогащения продукта крупностью менее 4 мм. Сепаратор имеет два валка 2 с зубцами треугольного сечения. Магнитная система сепаратора состоит из магнитопроводов прямоугольного сечения 4 с надетыми на них обмотками возбуждения 3 и полюсных наконечников 5 с желобчатым сечением. Магнитный поток замыкается по двум контурам через два рабочих зазора для каждого валка.

Максимальная индукция магнитного поля на зубцах валка составляет 1,65 Тл. В валках предусмотрены каналы для водяного охлаждения.

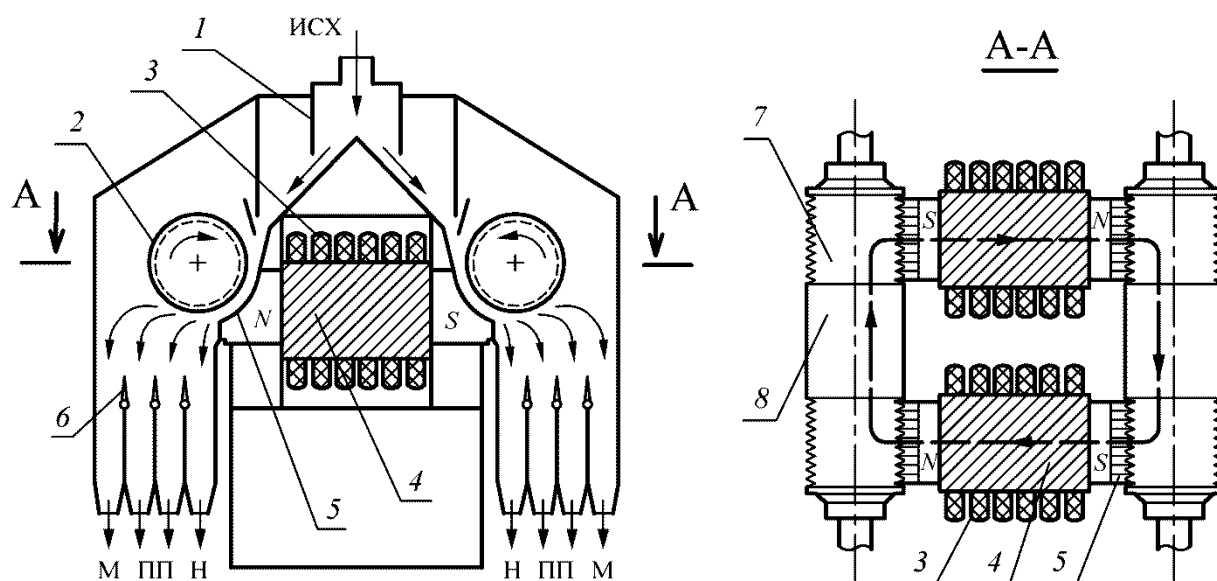


Рис. 4.11. Принципиальная конструкция сепаратора 2ЭВС-36/100:

1 – бункер-питатель; 2 – валки; 3 – обмотки возбуждения; 4 – магнитопровод; 5 – полюсные наконечники с желобчатым сечением; 6 – шиберы; 7 – рабочая часть валка с зубчатым сечением; 8 – нерабочая часть валка; м – магнитный продукт; пп – промпродукт; н – немагнитный продукт

Рабочие зоны сепаратора (зазоры) образуют части валков сепаратора 7 с выступами треугольного сечения и полюсные наконечники 5 с желобками, дно которых расположено напротив заострений зубцов валка (см. рис. 4.11).

Сепаратор 2ЭВС-36/100 работает следующим образом. Из питателя 1 исходный материал направляется на полюсные наконечники 5. По желобкам полюсных наконечников частицы движутся под двумя вращающимися валками 2. Слабомагнитные частицы притягиваются к зубцам вращающихся валков и выносятся ими за пределы действия магнитного поля, где происходит разгрузка слабомагнитных частиц в соответствующий приёмник сепаратора. Немагнитные частицы под действием силы тяжести разгружаются в месте окончания полюсного наконечника и поступают в свой приёмник.

На рис. 4.12 приведена принципиальная конструкция сепаратора 4ЭВМ-40/250. Сепаратор предназначен для мокрого обогащения продуктов крупностью менее 1 мм (модель «А») и менее 4 мм (модель «А32»).

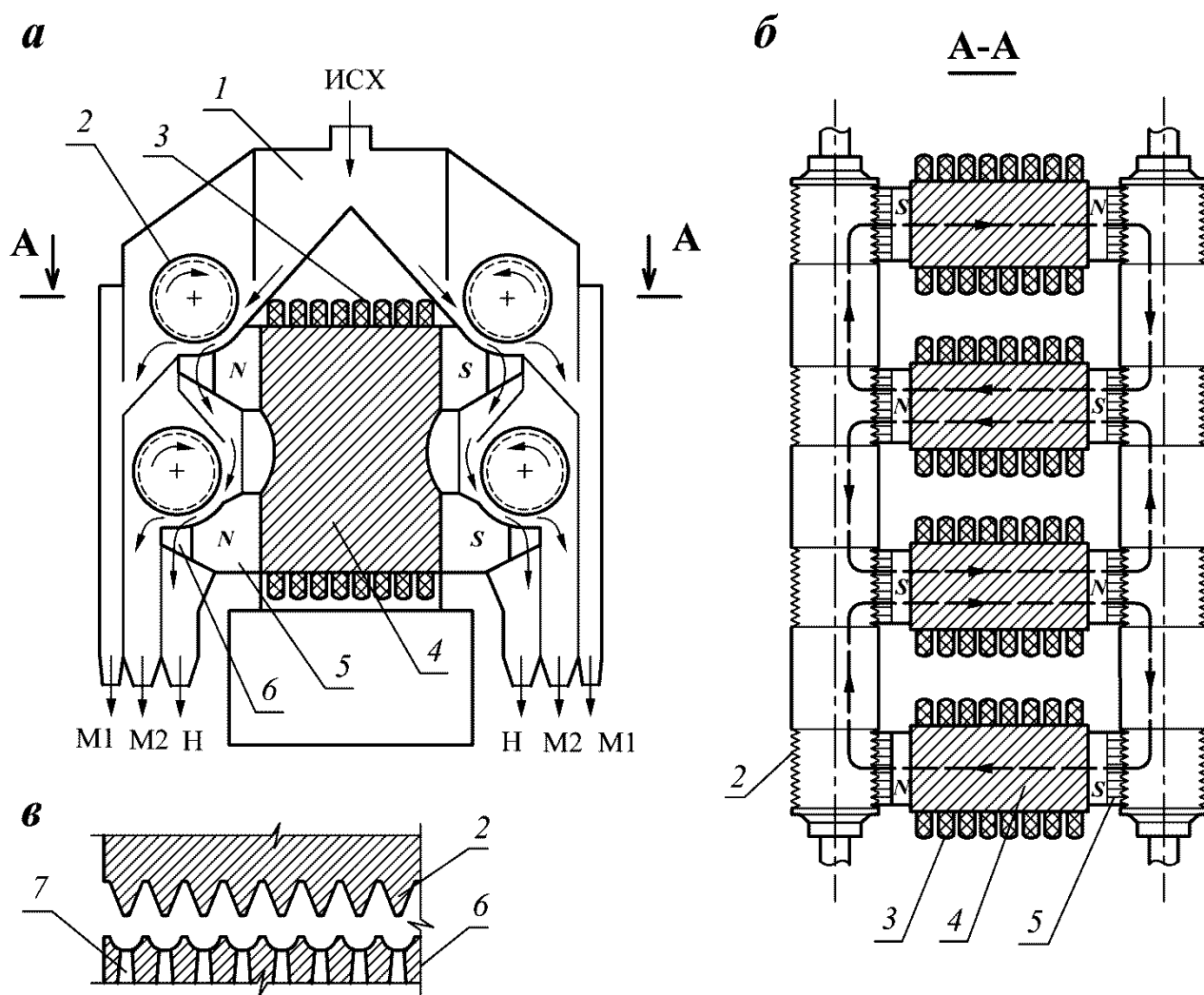


Рис. 4.12. Принципиальная конструкция сепаратора 4ЭВМ-40/250:

*а* – принципиальная конструкция; *б* – схема электромагнитной системы; *в* – фрагмент зубчатого валка и желобчатого полюсного наконечника со щелями:

1 – приёмный короб; 2 – валки; 3 – обмотки возбуждения; 4 – магнитопровод; 5 – полюсные наконечники с желобчатым сечением; 6 – часть полюсного наконечника с щелевидными отверстиями; 7 – щелевидные отверстия

Сепаратор имеет четыре рабочих валка 2 с зубцами треугольного сечения. Магнитная система сепаратора состоит из магнитопроводов прямоугольного сечения 4 с надетыми на них обмотками возбуждения 3 и полюсных наконечников 5. Части полюсных наконечников 6 имеют щелевидные отверстия 7 в зоне разгрузки немагнитных продуктов. Магнитный поток замыкается по трём контурам через четыре рабочих зазора для каждого валка (см. рис. 4.12).

Индукция магнитного поля сепаратора 4ЭВМ-40/250 составляет 1,4 Тл. Рабочие зоны сепаратора (зазоры) образуют части валков 2 сепаратора с зубцами треугольного сечения и полюсные наконечники 5 с желобками, дно которых расположено напротив заострений зубцов валка. Для разгрузки немагнитного продукта в частях полюсных наконечников 6 выполнены щелевидные отверстия 7 (см. рис. 4.12, в). Шаг и угол заострения зубцов и ширина щелевидных отверстий зависят от крупности обогащаемого материала. Для сепаратора 4ЭВМ-40/250А, предназначенного для обогащения продукта крупностью 0,1-1 мм, шаг зубцов валка составляет 16 мм, а для сепаратора 4ЭВМ-40/250А32, предназначенного для обогащения продукта крупностью 0,1-4 мм, – 32 мм.

Сепаратор 4ЭВМ-40/250 работает следующим образом. Из приёмного короба 1 исходный материал направляется на два верхних вращающихся валка 2 (см. рис. 4.12). Слабомагнитные частицы притягиваются к зубцам вращающихся валков и выносятся ими за пределы действия магнитного поля, где происходит разгрузка слабомагнитных частиц в соответствующее отделение ванны сепаратора (магнитный продукт № 1). Немагнитные частицы под действием силы тяжести и потока воды разгружаются через щели 7 полюсных наконечников и поступают на нижние валки на второй приём обогащения, с получением магнитного продукта № 2 и немагнитного продукта. Уровень пульпы в ваннах поддерживается постоянным с помощью переливных порогов.

#### **Валковые сепараторы с открытой зоной разделения с магнитной системой из постоянных редкоземельных магнитов**

Магнитные системы валковых сепараторов из редкоземельных постоянных магнитов позволяют создавать магнитные поля с индукцией до 2,1 Тл (например, сепараторы компании «Eriez»). Для изготовления постоянных магнитов используются следующие соединения:  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , реже  $\text{SmCo}_5$  или  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ . К недостаткам первых следует отнести восприимчивость к коррозии, к недостаткам вторых – более высокую стоимость.

По сравнению с валковыми сепараторами с электромагнитными замкнутыми системами, аппараты с системой из редкоземельных магнитов имеют сле-

дующие преимущества: 1) компактность, меньшую массу и малый расход электроэнергии (нет электромагнитной системы); 2) возможность создания сильного магнитного поля в открытой рабочей зоне разделения.

К недостаткам сепараторов с системой из редкоземельных магнитов можно отнести относительно высокую стоимость магнитной 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 зоне разделения сепараторов 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, позволяющими снизить индукцию магнитного поля до нуля при отключении электрического тока.

Наибольшее распространение получили сухие сепараторы с вращающимся магнитным валком. Принцип действия этих аппаратов аналогичен сепараторам с верхней подачей исходного продукта типа ПБС или шкивного типа. Для разгрузки магнитного продукта, притянувшегося к валку, используют либо щетку, либо бесконечную ленту, огибающую магнитный и натяжной валки.

Основным элементом сепаратора является магнитный валок, состоящий из вала 1, кольцеобразных постоянных магнитов 2 и шайб 3 из магнитномягкого материала (рис. 4.13, *а*). Соседние кольцевые магниты устанавливаются таким образом, чтобы они были обращены друг к другу одной полярностью. Такая конструкция магнитного валка, а также правильные соотношения толщины кольцеобразных магнитов и магнитномягких шайб позволяют создавать высокие магнитные поля с индукцией до 2,1 Тл. Зависимость индукции магнитного поля от расстояния до поверхности магнитного валка в зоне наивысшего градиента сепараторов фирмы «Raoul Lenoir» приведена на рис. 4.13, *б* [33]. Различные зависимости характеризуют свойства постоянных магнитов и их размеры.

Анализируя зависимости, приведённые на рис. 4.13, *б*, можно отметить следующее. Магнитная система хотя и обеспечивает высокое значение индукции магнитного поля, 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 может снизиться более чем в два раза. Поэтому все фирмы-производители стремятся максимально приблизить раз-

деляемый материал к поверхности магнитного вала путём применения верхней подачи исходного продукта и снижения толщины бесконечной ленты для разгрузки магнитного продукта (например, у сепаратора «Remroll» фирмы «Ore sorters international» используется кевларовая лента толщиной 0,15 мм) или применения щётки для разгрузки магнитного продукта с вала (отказ от бесконечной ленты).

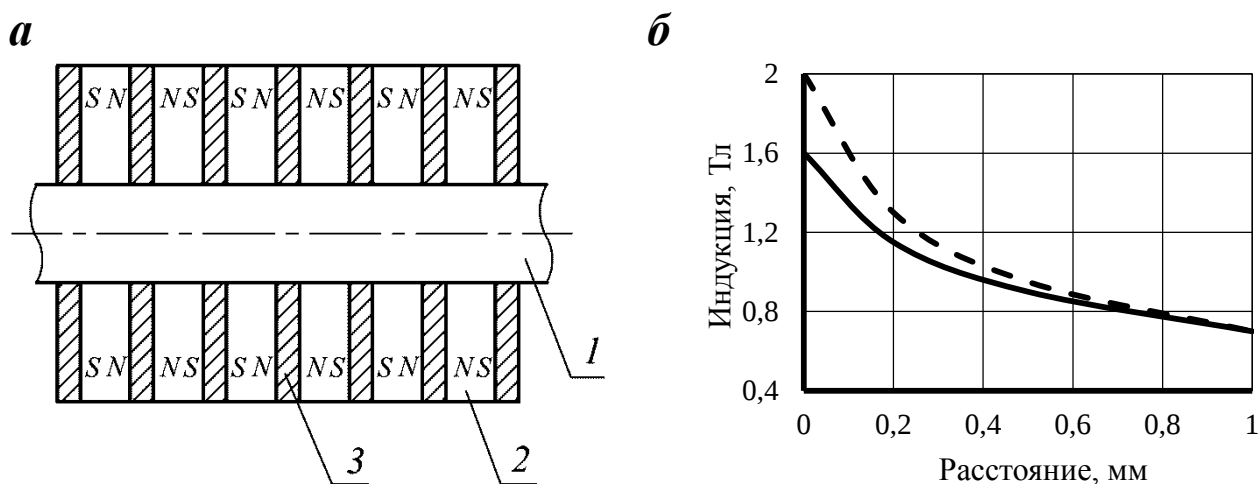


Рис. 4.13. Схема магнитного вала (а) и зависимость индукции магнитного поля от расстояния до поверхности магнитного вала (б) [33]:  
1 – вал; 2 – кольцеобразный магнит; 3 – магнитномягкая шайба

Сепараторы с магнитными валками из редкоземельных магнитов изготавливаются многими фирмами, например «Механобр-техника» (г. С-Петербург) [2, 78], «Эрга» (Калуга) [79], «Eriez» [80].

В табл. 4.7 приведены характеристики некоторых сепараторов Roll компании «Eriez» (данные взяты из официального каталога и с сайта компании [80]).

Таблица 4.7

Технические характеристики сепараторов «Roll» фирмы «Eriez»

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

Сепараторы отличаются диаметром (75, 100 и 300 мм) и длиной валков (различная производительность). Максимальная индукция магнитного поля 2,1 Тл, крупность перерабатываемого сырья от 0,075 до 13 мм. Разработаны сепараторы для сухого обогащения более мелкого материала (применение встряхивания и перемешивания).

Часто валковые сепараторы komponуются в многовалковые сепараторы из отдельных модулей с последовательным выделением магнитных продуктов. Обязательна предварительная сепарация в слабом магнитном поле для удаления сильномагнитных частиц.

#### **4.6. Высокоградиентные сепараторы для обогащения слабомагнитных руд**

К этой группе сепараторов относятся аппараты с зоной разделения, заполненной ферромагнитными телами, 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 (см. рис. 1.1, в). При помещении рабочей матрицы сепаратора, заполненной ферромагнитными телами, во внешнее магнитное поле ферромагнитные тела намагничиваются и создают более высокое магнитное поле с большим градиентом по сравнению с магнитным полем, создаваемым в воздушном зазоре внешней магнитной системой. 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 контактными относятся матрицы, у которых ферромагнитные тела (шарики, цилиндры) соприкасаются друг с другом. К бесконтактным относятся матрицы, у которых феррозаполнители (рифлённые пластины, стержни различного сечения) закреплены с зазорами друг относительно друга. Комбинированные матрицы заполняются ферромагнитными телами (сетки, 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). Феррозаполнители матриц изготавливаются из магнитно-мягких материалов с высокой магнитной проницаемостью, низкой остаточной индукцией и высокой абразивной и коррозионной стойкостью.

#### *Конструкции высокоградиентных сепараторов*

Принципиально высокоградиентные сепараторы можно разделить на два типа: сепараторы, разработанные на базе стандартных конструкций барабанных и валковых сепараторов (барабанные шариковые и валковые стержневые сепараторы); роторные сепараторы.

Барабанные шариковые и валковые стержневые сепараторы разработаны на основе стандартных конструкций барабанных сепараторов и валковых сепараторов с электромагнитной системой. Для повышения индукции магнитного поля на поверхность обечайки барабанного сепаратора укладываются железные шарики или окатыши (рис. 4.14, а). В валковом сепараторе 4ЭВМФ-45/250 для повышения индукции магнитного поля валки сепаратора выполнены в виде сплошных цилиндрических решёток, стержни которых параллельны оси вала [67]. Эти сепараторы в настоящее время практически не используются в связи с невысоким повышением индукции магнитного поля и низкой производительностью.

Наибольшее распространение получили роторные высокоградиентные сепараторы. Эти сепараторы имеют более сложную конструкцию и большие массу и размеры по сравнению с барабанными шариковыми сепараторами. Однако роторные сепараторы разрабатывались специально для мокрого обогащения слабомагнитных тонкоизмельчённых руд и продуктов. Поэтому они имеют высокую производительность (100 т/ч и более) и обеспечивают индукцию магнитного поля в зоне разделения до 2,4 Тл.

#### *Роторные высокоградиентные сепараторы*

Рабочим элементом этих аппаратов является вращающийся перфорированный ротор, разделённый на рабочие камеры (матрицы), заполненные ферромагнитными телами. Рабочая камера таких сепараторов поочередно входит в

зону 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 высокие значения магнитной силы. В основном используется электромагнитная система.

Ось вращения ротора сепараторов различных конструкций может быть как горизонтальной, так и вертикальной.

Роторные высокоградиентные сепараторы по направлению вектора магнитной индукции разделяют 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 относятся, например, сепаратор 2ЭРМ-5/100 компании НПК «Механобр-Техника», сепаратор «Джонса» фирмы «Humboldt Wedag» (Германия), сепараторы компании «НТЦ Магнис ЛТД».

Для создания вертикального вектора магнитной индукции используются электромагнитные системы, 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, например, сепараторы «Sala-Carousels» компании «Metso Minerals» и китайские сепараторы, получившие в России общее название «Slon».

Рассмотрим основные конструкции и принцип работы высокоградиентных сепараторов.

#### *Барабанные шариковые сепараторы*

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. Индукция магнитного поля таких сепараторов составляет 0,4-0,6 Тл.

Барабанные шариковые сепараторы ЭБМШ или ПБМШ разработаны для обогащения окисленных железных руд и шламов на фабриках невысокой производительности. Производительность сепараторов составляет 20-50 т/ч в зависимости от крупности и магнитных свойств исходного продукта. На поверхность барабана сепаратора уложены железные шарики или окатыши (ферромагнитные тела), которые намагничиваются под действием магнитной системы. Окатыши постоянно перекатываются и движутся в одном направлении с барабаном. В левой части сепаратора (рис. 4.14, 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.

Барабанный шариковый сепаратор (см. рис. 4.14, а) работает следующим образом. Пульпа исходного материала из приёмного короба 1 поступает на вращающийся барабан 2 напротив верхней части неподвижной магнитной системы 3, 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 некоторых конструкций сепараторов снабжена неподвижными немагнитными полками, по которым окатыши скатываются вниз.

В настоящее время барабанные шариковые сепараторы практически не применяются в связи с низкой индукцией магнитного поля и низкой производительностью.

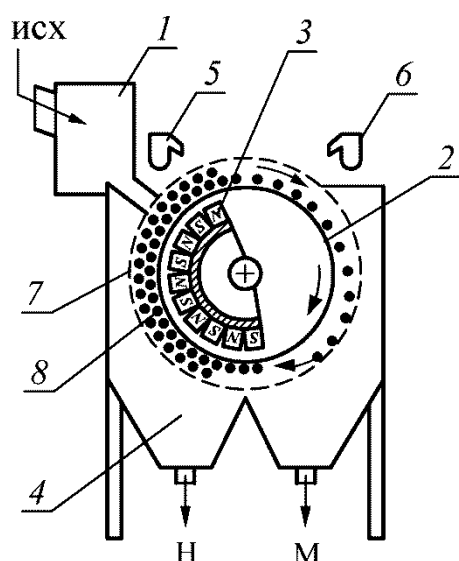
*Сепаратор типа «Slon» с вертикальным вектором магнитной индукции с горизонтальной осью вращения ротора*

Рабочим элементом сепаратора типа «Slon» является вращающийся ротор 3, разделённый на рабочие камеры 4 (рис. 4.14, в). Рабочие камеры сепаратора в основном заполняются матрицами из стержней кругового или шестигранного

сечения. В нижней части ротора стержни располагаются перпендикулярно вектору магнитной индукции (горизонтально).

Электромагнитная система сепаратора состоит из магнитопровода 5 и обмоток возбуждения 6. Максимальная индукция магнитного поля сепараторов компании «Huate» (Китай) с принудительным охлаждением обмоток возбуждения достигает 2,4 Тл, без принудительного охлаждения – 1,2 Тл.

***а***



***б***

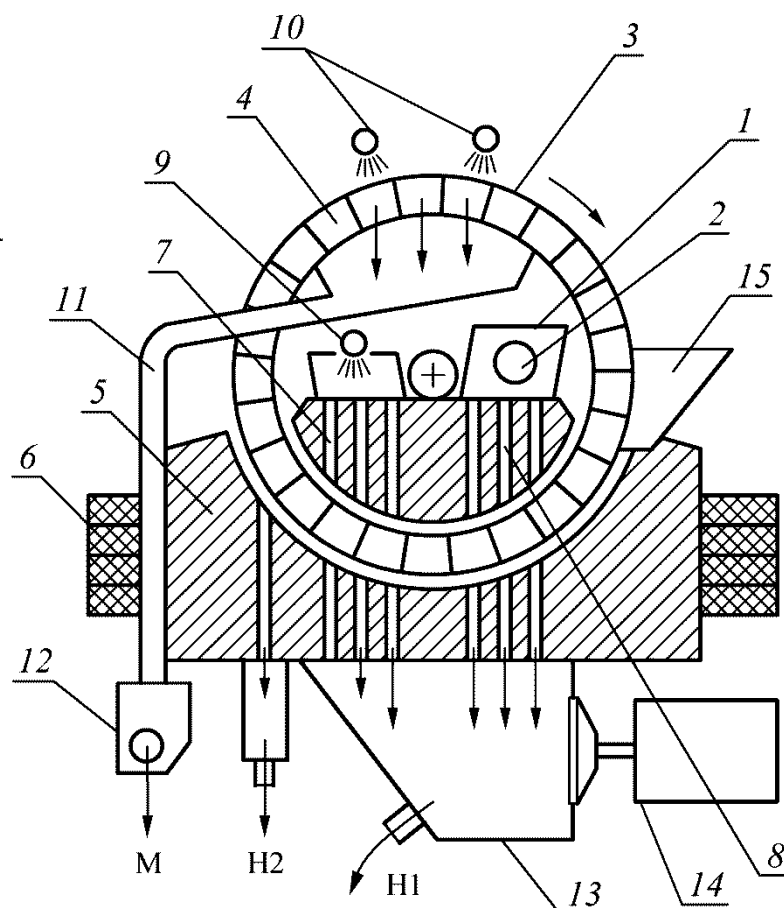


Рис. 4.14. Принципиальные конструкции барабанного шарикового сепаратора и сепаратора типа «Slon» компании «Huate» (Китай):

*а* – барабанный шариковый сепаратор: 1 – приёмный короб; 2 – барабан; 3 – магнитная система; 4 – ванна; 5 – устройство для подачи промывной воды; 6 – устройство для подачи смывной воды; 7 – неподвижная сетка; 8 – шарики или окатыши;

*б* – сепаратор «Slon»: 1 – приёмный короб; 2 – трубопровод исходной пульпы; 3 – ротор; 4 – рабочая камера (матрица); 5 – магнитопровод; 6 – обмотки возбуждения; 7 – каналы в магнитопровод для подачи промывной воды; 8 – каналы в магнитопровод для подачи исходной пульпы и для разгрузки немагнитного продукта; 9 – устройство для подачи промывной воды; 10 – устройство для подачи смывной воды; 11 – трубопровод магнитного продукта; 12 – приёмник магнитного продукта; 13 – ванна; 14 – пульсирующее устройство; 15 – сборник оборотной воды

Сепаратор типа «Slon» работает следующим образом (см. рис. 4.14, *б*). Пульпа исходного продукта поступает в приёмный короб 1 и далее по каналам

8 поступает в рабочие матрицы ротора, расположенные в зоне действия магнитного поля. Немагнитные частицы проходят между стержнями и по каналам 8 поступают в ванну немагнитного продукта 13. Слабомагнитные частицы закрепляются на намагниченных стержнях.

При повороте ротора рассматриваемые рабочие матрицы проходят под каналами 7, по которым подаётся промывная вода для удаления механически закрепившихся на стержнях немагнитных частиц. При этом рабочие матрицы находятся в зоне действия магнитного поля.

При дальнейшем движении ротора рабочие матрицы выходят из зоны действия магнитного поля. Стержни матриц размагничиваются и больше не удерживают слабомагнитные частицы. В верхней части ротора в рабочие матрицы из устройства 10 подаётся смывная вода для разгрузки слабомагнитных частиц, которые по трубопроводу 11 поступают в приёмник магнитного продукта 12.

Далее рассматриваемые рабочие матрицы ротора опять заходят в зону подачи исходного продукта и процесс разделения повторяется.

С целью снижения механической забивки матриц (зазоров между стержнями) немагнитными частицами применяется пульсирующее устройство 14, создающее в ванне 13 пульсации воды в вертикальном направлении. Это позволяет увеличить продолжительность непрерывной работы сепаратора и повысить качество магнитного продукта за счёт снижения вероятности попадания в него немагнитных частиц.

В табл. 4.8 приведены характеристики некоторых сепараторов «LHGC» компании «Huatae» (данные взяты из официального каталога и с сайта компании [77]). Цифра в обозначении сепаратора характеризует величину диаметра ротора (в дм), буква «F» после цифры – принудительное охлаждение обмоток возбуждения; «Z» – без охлаждения.

*Сепаратор «Sala – Carousels» с вертикальным вектором магнитной индукции с вертикальной осью вращения ротора*

Высокоградиентные сепараторы «Sala-Carousels» компании «Metso Minerals» имеют кольцеобразный рабочий орган (ротор) 1, разделённый на рабочие камеры 2, в качестве матриц которых использованы пакеты горизонтально уложенных сеток (рис. 4.15). Рабочие камеры ротора проходят через замкнутую магнитную систему, создающую магнитный поток в вертикальном направлении. Электромагнитная система состоит из водоохлаждаемых медных обмоток 3 и магнитопровода 4 и расположена таким образом, что один полюс нахо-

дится над ротором, а другой – под ротором. Индукция магнитного поля составляет 0,5-1,5 Тл.

Таблица 4.8

Технические характеристики сепараторов «LHGC» компании «Huate»

| Параметры                                 | LHGC-5F        | LHGC-7F        | LHGC-10F       | LHGC-20F       | LHGC-30F       |
|-------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Производительность, т/ч                   | 0,03-0,125     | 0,1-0,5        | 4-7            | 50-80          | 150-250        |
| Крупность питания, мм                     | 0-1            | 0-1            | 0-1,2          | 0-1,2          | 0-1,2          |
| Содержание твёрдого в питании, %          | 10-40          |                |                |                |                |
| Индукция магнитного поля, Тл              | 2,4 (1,2)      |                |                |                |                |
| Мощность электромагнита, кВт              | 20 (6)         | 30 (8)         | 40 (10)        | 85 (29)        | 110 (48)       |
| Мощность электродвигателя, кВт            | 0,18           | 0,75           | 1,1            | 5,5            | 18,5           |
| Мощность электродвигателя пульсатора, кВт | 0,55           | 1,5            | 2,2            | 7,5            | 18,5           |
| Габаритные размеры, мм                    | 1800x1400x1320 | 2000x1360x1680 | 2700x2000x2400 | 4200x3550x4200 | 7600x6500x7200 |
| Масса, т                                  | 4 (1,5)        | 8 (3,5)        | 15 (7)         | 60 (39)        | 165 (135)      |

Примечание. В скобках приведены параметры сепараторов модели «Z» без охлаждения обмоток возбуждения.

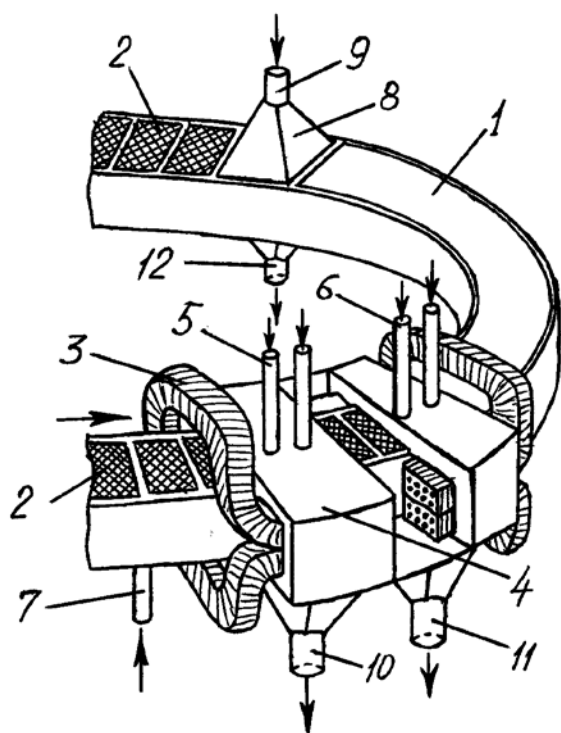
Сепаратор работает следующим образом (см. рис. 4.15). Исходная пульпа и промывная вода подаются в рабочие камеры сепаратора, находящиеся в зоне действия магнитного поля, сверху по патрубкам 5 и 6 соответственно, а затем через щелевидные отверстия в верхнем полюсе магнитной системы. Через щелевидные отверстия 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. Корпус электромагнитной системы называется станцией загрузки исходной пульпы и разгрузки немагнитного продукта 13 или «магнитной головкой».

В процессе вращения ротора рабочая камера заходит в станцию разгрузки магнитного продукта 8. Станция разгрузки магнитного продукта имеет два варианта исполнения. При первом варианте смывная вода подаётся по патрубкам 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.

*а*



*б*

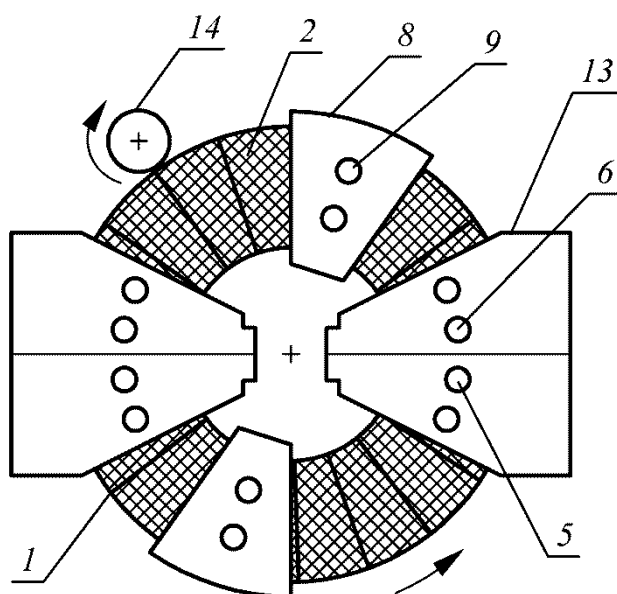


Рис. 4.15. Принципиальная конструкция сепаратора «Sala-Carousels»:

*а* – принцип работы и конструкция основных элементов: 1 – ротор; 2 – рабочие камеры (матрицы); 3 – обмотки возбуждения; 4 – магнитопровод; 5 – патрубки для подачи исходной пульпы; 6 – патрубки для подачи промывной воды; 7 – патрубков 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;

*б* – вид в плане: 13 – станция загрузки исходной пульпы и разгрузки немагнитного продукта; 14 – электродвигатель

Компания «Metso Minerals» предлагает несколько моделей сепараторов «Sala-Carousels», отличающихся количеством и мощностью электромагнитных систем (магнитных головок), размерами и производительностью. В табл. 4.9 приведены основные технические характеристики некоторых моделей сепараторов «Sala-Carousels» (данные взяты из официального каталога и с сайта компании [76]). Модель сепаратора обозначается, например, HGMS-350-05-3. Первая цифра является основной и характеризует величину среднего диаметра ротора (окружности, проходящей по центрам рабочих камер, в см), вторая цифра – величину индукции магнитного поля (например, 05 – 0,5 Тл, 15 – 1,5 Тл), третья цифра – количество магнитных головок. Для сепараторов моделей 120, 185

и 250 количество магнитных головок может быть равным 1 или 2, для сепараторов модели 350 количество магнитных головок может быть равным 1, 2 и 3.

Таблица 4.9

Технические характеристики сепараторов «Sala-Carousels»

| Модель | Габаритные размеры, мм   | Количество магнитных головок | Индукция магнитного поля, Тл | Мощность электромагнитов, кВт | Масса без магнитной системы, т | Масса магнитных систем, т | Производительность*, т/час |
|--------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 120    | 2500х<br>х2200х<br>х2880 | 2                            | 0,5<br>0,7<br>1,0<br>1,5     | 25<br>40<br>75<br>175         | 6                              | 2<br>3<br>3<br>5          | 6                          |
| 185    | 4100х<br>х3700х<br>х3600 | 2                            | 0,5<br>0,7<br>1,0<br>1,5     | 35<br>65<br>85<br>200         | 10                             | 6<br>9<br>18<br>31        | 35                         |
| 250    | 4700х<br>х4500х<br>х3600 | 2                            | 0,5<br>0,7<br>1,0<br>1,5     | 45<br>75<br>100<br>220        | 20                             | 12<br>17<br>34<br>58      | 75-100                     |
| 350    | 7000х<br>х7000х<br>х3700 | 3                            | 0,5<br>0,7<br>1,0<br>1,5     | 70<br>120<br>150<br>320       | 40                             | 26<br>39<br>73<br>127     | 150                        |

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

*Сепаратор 2ЭРМ-5/100 (НПК «Механобр-Техника») с горизонтальным вектором магнитной индукции с вертикальной осью вращения ротора*

Сепаратор 2ЭРМ-5/100 имеет магнитную систему, создающую горизонтальный магнитный поток в рабочей зоне разделения. Сепаратор (рис. 4.16) состоит из двух роторов 4 и 5 с рабочими камерами 6, заполненными рифлёными пластинами, приёмного короба 1 для подачи исходной пульпы в рабочую камеру ротора, устройств для промывки и смыва концентрата 10, ванн 8 и 9 для сбора продуктов обогащения, электромагнитной системы, включающей обмотки возбуждения 3 и магнитопровод 2 с полюсными наконечниками. Электромагнитная система охлаждается потоком воздуха, нагнетаемым вентиляторами 14. Сепаратор имеет специальные очистные устройства для очистки рабочих зазоров между пластинами от сильномагнитных частиц с помощью сжатого воздуха, установленные над рабочими камерами ротора вне зоны действия магнитного поля.

Сепаратор может работать в двух режимах. При первом режиме исходное питание делится в приёмном коробе-пульподелителе 1 на два потока, которые подаются на верхний и нижний роторы. При втором режиме исходное питание подаётся на верхний ротор, а на нижнем роторе осуществляется перечистка немагнитного продукта верхнего ротора. При втором режиме производительность сепаратора ниже.

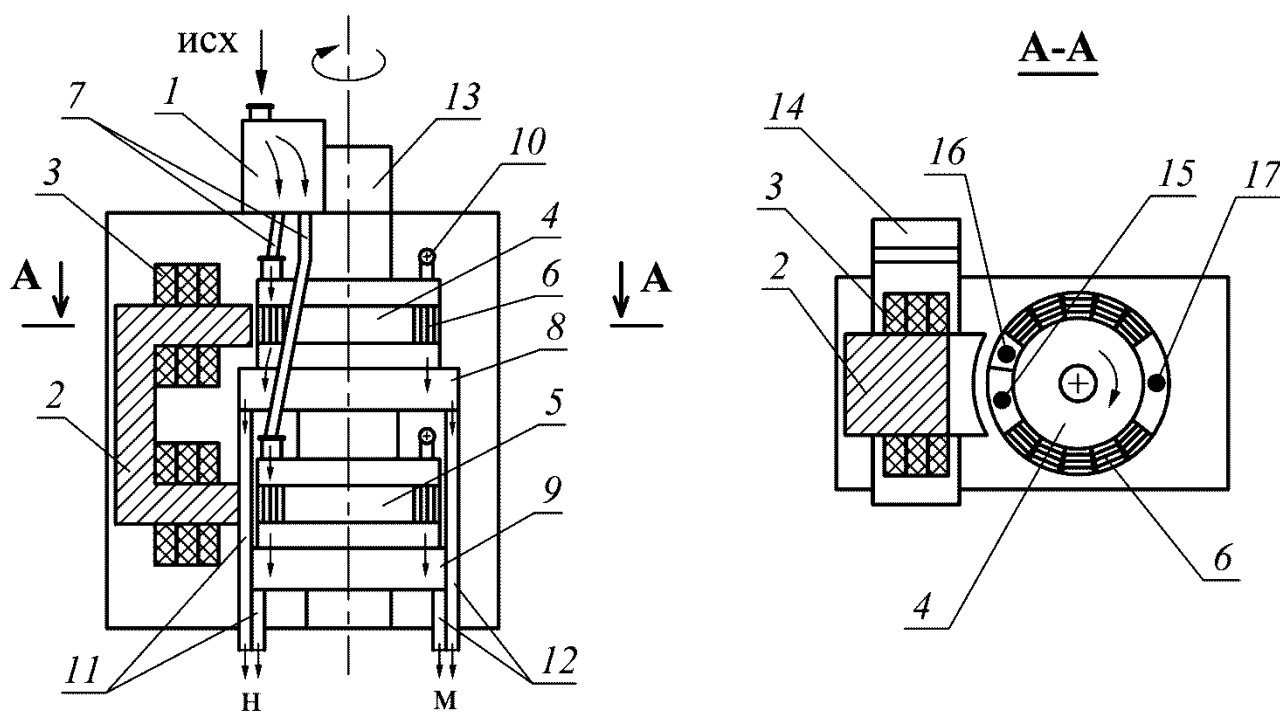


Рис. 4.16. Принципиальная конструкция сепаратора 2ЭРМ-5/100:

1 – приёмный короб-пульподелитель; 2 – магнитопровод; 3 – обмотки возбуждения; 4 и 5 – верхний и нижний роторы; 6 – рабочие камеры (матрицы); 7 – трубопроводы питания; 8 и 9 – верхняя и нижняя ванны; 10 – устройство для подачи смывной воды; 11 и 12 – трубопроводы для разгрузки соответственно немагнитного и магнитного продуктов; 13 – электропривод роторов; 14 – вентиляторы охлаждения; 15 – зона загрузки исходного и разгрузки немагнитного продуктов; 16 – зона подачи промывной воды и разгрузки промпродукта; 17 – зона подачи смывной воды или сжатого воздуха и разгрузки магнитного продукта

Сепаратор 2ЭРМ-5/100 в первом режиме разделения работает следующим образом (см. рис. 4.16). Исходная пульпа по трубопроводам 1 подаётся сверху в рабочие камеры верхнего и нижнего роторов сепаратора, находящиеся в зоне действия магнитного поля. Немагнитные частицы по зазорам между рифлёными пластинами камер поступают в ванны и по трубопроводам 11 – в приёмник немагнитной фракции. Слабомагнитные частицы притягиваются к заострениям на рифлениях намагниченных пластин, находящихся в зоне действия магнитного поля 15.

В процессе вращения верхнего и нижнего роторов рабочие камеры пересекают зону 16. При нахождении камер в зоне 16 в них сверху подаётся промывная вода для удаления в промпродукт или в хвосты частиц с промежуточными магнитными свойствами.

В дальнейшем рабочие камеры выходят из зоны действия магнитного поля, пересекают зону 17. Рифлёные пластины размагничиваются и не удерживают слабомагнитные частицы. Сверху подаётся смывная вода для разгрузки слабомагнитных частиц, которые по трубопроводам 12 поступают в приёмник магнитной фракции.

В табл. 4.10 приведены технические характеристики некоторых сепараторов НПК «Механобр-техника». Сепаратор ЭРМ-5/100 имеет один ротор. В остальном конструкция сепаратора ЭРМ-5/100 аналогична конструкции сепаратора 2ЭРМ-5/100.

Таблица 4.10

Технические характеристики высокоградиентных сепараторов  
НПК «Механобр-техника» [78]

| Параметры                                               | ЭРМ-5/100 | 2ЭРМ-5/100   |
|---------------------------------------------------------|-----------|--------------|
| Производительность по твёрдому, т/ч                     | 5         | 8-10 (4-5) * |
| Крупность исходного материала, мм                       | 0,5       | 0,5          |
| Диаметр ротора, мм                                      | 1000      | 1000         |
| Индукция магнитного поля, Тл                            | 1,3       | 1,4          |
| Установленная мощность электродвигателей, кВт:          |           |              |
| - привода ротора                                        | 1,5       | 3            |
| - вентиляторов охлаждения                               | 2,2       | 2 x 11       |
| Мощность, потребляемая электромагнитной системой, кВт/ч | 14,5      | 25           |
| Расход промывной и смывной воды, м <sup>3</sup> /ч      | 10        | 20           |
| Габаритные размеры, мм:                                 |           |              |
| - длина                                                 | 2500      | 2500         |
| - ширина                                                | 2300      | 2300         |
| - высота                                                | 2500      | 3500         |
| Масса, кг                                               | 7740      | 14000        |

\* В скобках приведена производительность при работе сепаратора с использованием нижнего ротора для пересортировки немагнитного продукта верхнего ротора.

Достоинством сепараторов НПК «Механобр-Техника» является простота конструкции, механическая надёжность и высокие достигаемые технологические показатели. Оригинальная конструкция рифлёных пластин обеспечивает длительную продолжительность работы без засорения рабочей зоны сильномагнитными и крупными немагнитными частицами.

В России высокоградиентные сепараторы производит только НПК «Механобр-Техника». По сравнению с зарубежными аппаратами отечественные сепараторы имеют более низкую производительность, что связано с отсутствием необходимости перерабатывать в крупных масштабах слабомагнитные руды.

*Сепаратор JONES WHIMS (сепаратор Джонса) с горизонтальным вектором магнитной индукции с вертикальной осью вращения ротора*

Сепараторы Джонса (Германия) имеют магнитную систему, создающую горизонтальный магнитный поток. Сепаратор Джонса (рис. 4.17) состоит из электромагнитной системы, двух роторов 1 с рабочими камерами 2, заполненными рифлёными пластинами, приёмников для подачи исходной пульпы в рабочую камеру ротора, устройства для промывки и смыва концентрата и ванн для сбора продуктов обогащения. Электромагнитная система состоит из магнитопровода 3, полюсных наконечников 5, четырёх медных катушек 4, охлаждаемых потоком воздуха, нагнетаемым вентиляторами 6. 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.

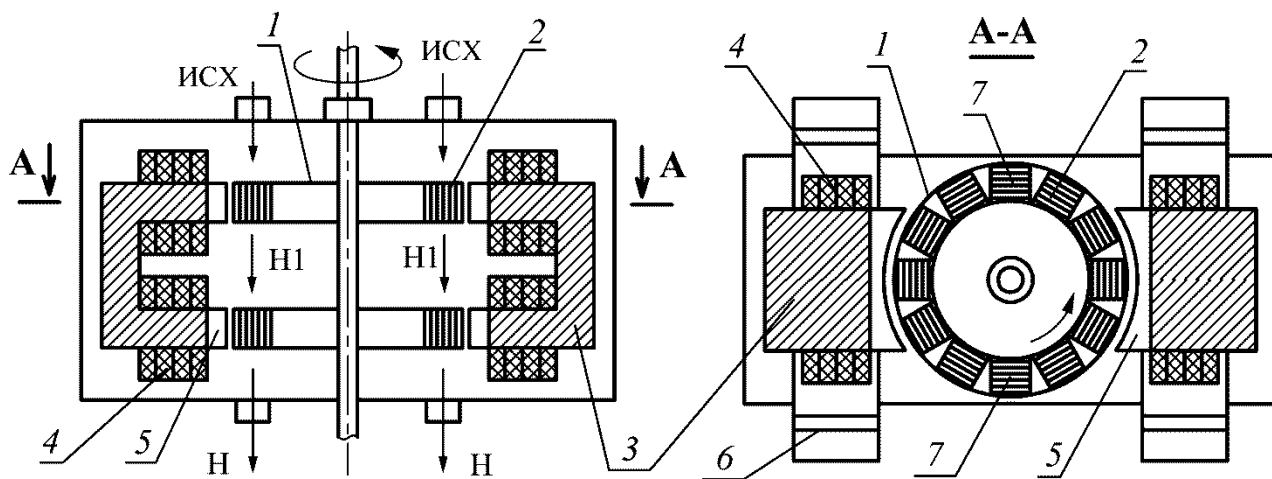


Рис. 4.17. Принципиальная конструкция сепаратора Джонса:

1 – ротор; 2 – рабочие камеры (матрицы); 3 – магнитопровод; 4 – обмотки возбуждения; 5 – полюсные наконечники; 6 – вентиляторы охлаждения; 7 – зоны разгрузки магнитного продукта

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 феррозаклнпнтеля рабочих камер роторов применены пластины с шагом нарифлений 3,2 мм. Пластины установлены вертикально с зазором 0,8-2,5 мм. Индукция магнитного поля составляет 1,2 Тл, она одинакова для верхнего и нижнего роторов. Мощность возбуждения магнитного поля сепаратора ДР-317 достигает 75 кВт.

Сепаратор работает следующим образом (см. рис. 4.17). Исходная пульпа подается сверху в рабочие камеры верхнего ротора сепаратора, находящиеся в зоне действия магнитного поля. Немагнитные частицы и неизвлеченные слабомагнитные частицы проходят по зазорам между рифлеными пластинами камер верхнего ротора и поступают в рабочие камеры нижнего ротора сепаратора, находящиеся в зоне действия магнитного поля. Немагнитные частицы проходят по зазорам между рифлеными пластинами камер нижнего ротора и поступают в приемник немагнитной фракции. Слабомагнитные частицы притягиваются к заострениям нарифлений намагниченных пластин.

В процессе вращения верхнего и нижнего роторов рабочие камеры выходят из зоны действия магнитного поля. Рифленые пластины размагничиваются и не удерживают слабомагнитные частицы. Сверху подается вода для разгрузки слабомагнитных частиц.

В табл. 4.11 приведены технические характеристики некоторых сепараторов JONES WHIMS.

Таблица 4.11

Технические характеристики высокоградиентных сепараторов Джонса [34]

| 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                 | 110    | 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 твердого 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 надежность 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.

### *Достоинства и недостатки роторных высокоградиентных сепараторов*

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

К недостаткам всех конструкций роторных высокоградиентных сепараторов относятся высокие расходы электроэнергии и воды при обогащении и резкое возрастание массы, размеров и цены при использовании сепаратора с высокой производительностью. Так, удельный расход электроэнергии на 1 т руды достигает: 0,5 кВт·ч/т (сепаратор Джонса); 2,4 кВт·ч/т («Sala-Carousels»); 3,45 кВт·ч/т («Крупп-Сол»), а удельный расход воды на 1 т руды достигает: 2,05 м<sup>3</sup>/т (сепаратор Джонса); 24 м<sup>3</sup>/т («Sala-Carousels») [34].

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.

*Роторные высокоградиентные сепараторы с магнитной системой из постоянных редкоземельных магнитов*

В настоящее время для создания магнитной системы роторных высокоградиентных сепараторов используются постоянные редкоземельные магниты (Nd-Fe-B).

Компания «Eriez» разработала сепаратор «Железное колесо» с горизонтальной осью вращения ротора [80]. Принцип разделения в сепараторе «Железное колесо» аналогичен принципу разделения в сепараторе типа «Slon».

Достоинствами высокоградиентных сепараторов с магнитной системой из постоянных магнитов являются меньшие масса и размеры и отсутствие потребления электроэнергии на создание магнитного поля.

## **4.7. 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 соленоида жидким гелием ( $T=4,2$  К) 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 слабомагнитных минералов и других продуктов. Разработаны опытные образцы промышленных сепараторов со сверхпроводящими магнитными системами, например барабанный сепаратор компании «Крупп» (Германия) и высокоградиентные сепараторы с использованием рабочей камеры (матрицы) из стальной «шерсти», помещённой в сверхпроводящий соленоид [21].

Больших успехов в разработке конструкции и производстве промышленных сверхпроводящих магнитных сепараторов достигла компания «Huate» (Китай). На рис. 4.18 приведена принципиальная конструкция сверхпроводящего сепаратора компании «Huate».

Электромагнитная система сепаратора состоит из соленоидной катушки 1 из Nb-Ti проводника, охлаждаемой жидким гелием ( $T=4,2$  К). Индукция магнитного поля достигает 5,5 Тл. Мощность возбуждения магнитного поля составляет 1,5 кВт. По данным производителя, продолжительность работы криогенной установки без пополнения объёма жидкого гелия составляет 3 года.

Рабочим элементом сепаратора является цилиндр 2, включающий две рабочие камеры-матрицы 3, заполненные стальной «шерстью». Цилиндр совершает возвратно-поступательные движения внутри сверхпроводящего соленоида с остановками для цикличной подачи исходной пульпы и разгрузки немагнитного продукта из одной матрицы и подачи промывной воды и разгрузки слабомагнитных частиц из другой матрицы.

Сепаратор работает следующим образом (см. рис. 4.18).

В положении рабочего цилиндра, показанного на рис. 4.18, левая матрица находится внутри соленоида в зоне действия магнитного поля, правая матрица находится снаружи соленоида вне зоны действия магнитного поля. В левую матрицу из бака 5 по гибкому трубопроводу подаётся исходная пульпа. Слабомагнитные частицы притягиваются к намагниченным волокнам стальной «шерсти». Немагнитные частицы с водой проходят через объём стальной «шерсти» и

по трубопроводу поступают в бак очищенного продукта 6. В правую матрицу из бака 7 по гибкому трубопроводу подаётся смывная вода. Волокна стальной «шерсти» размагничены и не удерживают слабомагнитные частицы. Вода промывает объём стальной «шерсти» и смывает слабомагнитные частицы, которые в дальнейшем вместе с водой по гибкому трубопроводу поступают в бак слабомагнитного продукта 8.

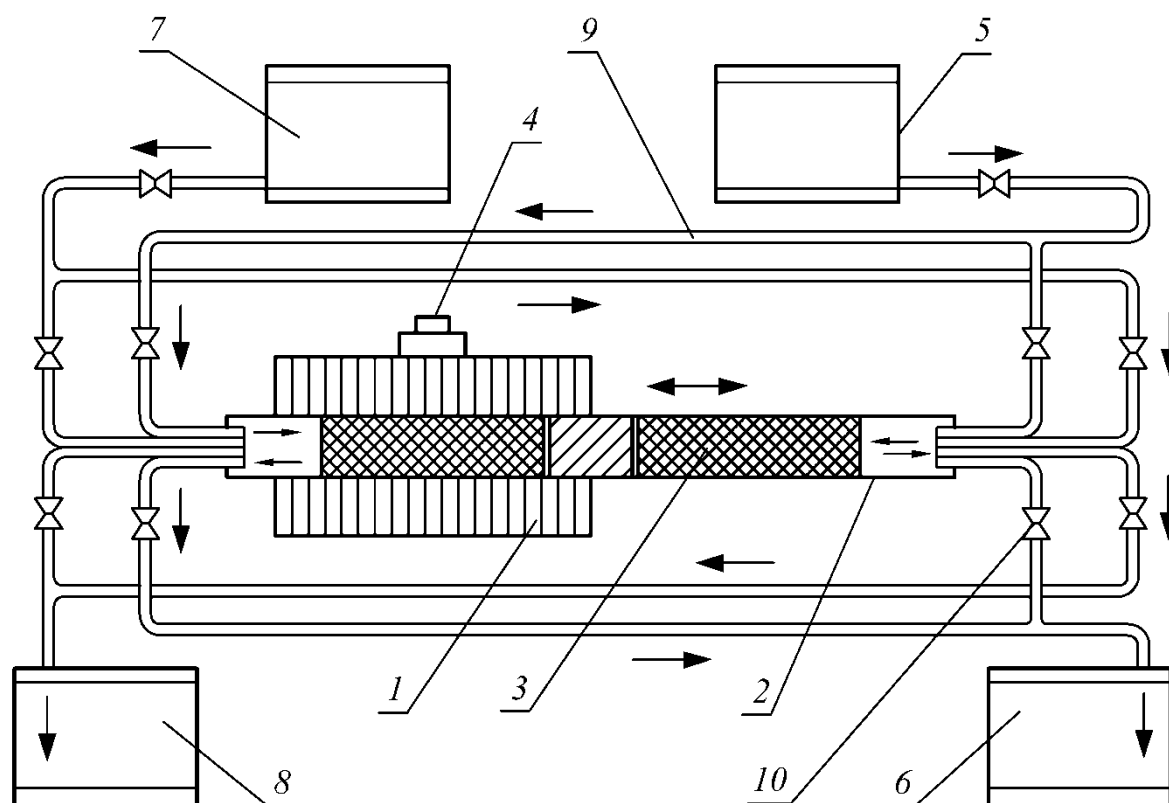


Рис. 4.18. Принципиальная конструкция сверхпроводящего сепаратора «Нuate»:

1 – сверхпроводящий соленоид; 2 – цилиндр; 3 – рабочие камеры (матрицы); 4 – корпус ввода трубопроводов системы охлаждения соленоида и кабеля электропитания; 5 – бак пульпы исходного продукта; 6 – бак очищенного продукта; 7 – бак промывной воды; 8 – бак слабомагнитных частиц; 9 – гибкие трубопроводы; 10 – задвижки

Далее цилиндр перемещается в левую сторону. Левая матрица выходит из зоны действия магнитного поля. В левую матрицу из бака 7 подаётся смывная вода, и из неё осуществляется разгрузка слабомагнитных частиц в бак 8. Правая матрица находится внутри соленоида в зоне действия магнитного поля. В правую матрицу из бака 5 подаётся пульпа исходного материала, и из неё осуществляется разгрузка очищенного немагнитного продукта в бак 6.

Далее цилиндр перемещается в правую сторону и технологический процесс разделения повторяется. Процессы подачи питания и воды из баков 5 и 7 в

правую или в левую матрицу и разгрузки очищенного продукта и слабомагнитных частиц из правой или из левой матрицы автоматизированы и осуществляются путём открытия-закрытия задвижек 10.

Продолжительность цикла подачи исходной пульпы и разгрузки немагнитного продукта из одной матрицы и подачи промывной воды и разгрузки слабомагнитных частиц из другой матрицы задаётся исходя из свойств исходного продукта и требований к готовому продукту. Для увеличения непрерывного срока работы сепаратора предусмотрена периодическая химическая очистка рабочих матриц (стальной «шерсти»).

Сепараторы применяются для очистки каолинового, кварцевого, полевошпатового и другого сырья от слабомагнитных примесей.

В табл. 4.12 приведены технические характеристики сверхпроводящих сепараторов компании «Huate».

Таблица 4.12

Основные технические характеристики сверхпроводящих магнитных сепараторов компании «Huate» [77]

| Параметры                                 | Тип сепаратора |             |
|-------------------------------------------|----------------|-------------|
|                                           | Ф300           | Ф500        |
| Диаметр зоны разделения, мм               | 300            | 500         |
| Производительность, т/ч                   | до 4           | до 15       |
| Режим работы                              | непрерывный    | непрерывный |
| Скорость потока пульпы, см/с              | 0,6-2,5        | 0,6-3,8     |
| Максимальная индукция магнитного поля, Тл | 5,5            | 5,0         |
| Мощность возбуждения магнитного поля, кВт | до 1,5         | до 1,5      |
| Общая мощность сепаратора, кВт            | до 11          | до 20       |
| Рабочая температура сверхпроводника, К    | 4,2            | 4,2         |

Разработка производительных и надёжных сепараторов со сверхпроводящими магнитными системами позволит расширить область использования магнитного метода обогащения и вовлечь в переработку труднообогащаемое тонкоизмельчённое сырьё с весьма низкими магнитными свойствами.

#### 4.8. Вспомогательное оборудование, применяемое при обогащении сильномагнитных руд

##### *Магнитные дешламаторы*

Магнитные дешламаторы (МД) применяют на обогатительных фабриках для обесшламливания сливов гидроциклонов с выводом в хвосты шламов пу-

стой породы и мелких бедных сростков и для сгущения магнетитовых концентратов перед фильтрованием.

Магнитный дешламатор (рис. 4.19) представляет собой сгуститель с центральным приводом, состоящий из чана цилиндрической формы 1, гребковой рамы 2, закреплённой на валу, приёмного бака 3, кольцевого сливного желоба 6 и разгрузочного отверстия 7. Особенностью дешламаторов является наличие намагничивающих устройств для исходной пульпы 4. В качестве намагничивающих устройств в основном используются плоские замкнутые магнитные системы из постоянных магнитов, создающие горизонтальное магнитное поле, через которое проходят частицы.

Магнитный дешламатор работает следующим образом. При прохождении пульпы через магнитное поле намагничивающих устройств 4 частицы магнетита образуют более крупные агрегаты – флокулы. Скорость осаждения флокул более высокая по сравнению с тонкими частицами шламов и бедных сростков. Поэтому магнетитовые флокулы быстрее осаждаются на дно дешламатора и выводятся через разгрузочное отверстие. Вращающаяся гребковая рама 2 способствует получению более плотного сгущённого продукта (песков) и взмучиванию оседающего шлама. Вода вместе со шламами переливается через кромки кольцевого сливного желоба 6 и выводится из дешламатора в хвосты.

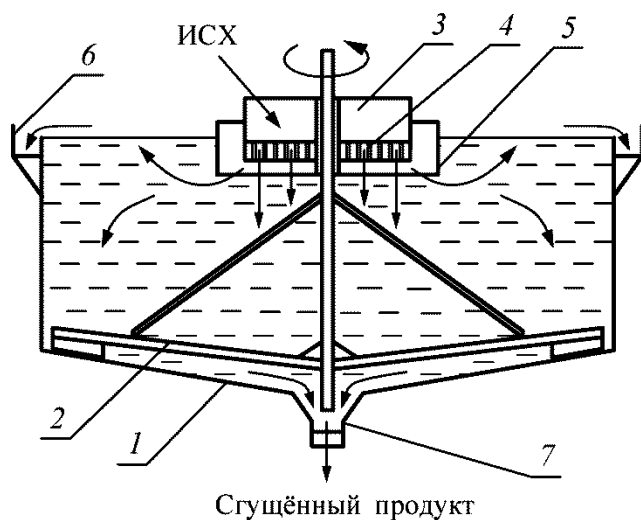


Рис. 4.19. Магнитный дешламатор:  
1 – чан; 2 – гребковая рама; 3 – приёмный бак;  
4 – намагничивающие устройства; 5 – успокоитель пульпы; 6 – кольцеобразный сливной желоб; 7 – разгрузочное отверстие

Индукция магнитного поля намагничивающих устройств дешламаторов составляет порядка 0,05 Тл.

Дешламаторы могут иметь дополнительные намагничивающие устройства, закреплённые на вращающейся гребковой раме. Также используются конструкции дешламаторов с созданием восходящего потока воды и с сифонной разгрузкой сгущённого продукта [19, 21, 35]. Встречный поток воды позволяет удалить в хвосты большее количество шламов.

Магнитные дешламаторы применяют в схемах обогащения железистых кварцитов, при измельчении которых образуется большое количество шламов.

В схемах обогащения скарновых магнетитовых руд и титаномagnetитовых руд операция обесшламливания готового продукта цикла измельчения (сливов гидроциклонов) применяется редко. Технические характеристики дешламаторов приведены в табл. 4.13 [69].

Таблица 4.13

Технические характеристики магнитных дешламаторов

| Параметры                                                                         | МД-5  | МД-9    | МД-12   |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|---------|---------|
| Диаметр чана, мм                                                                  | 5000  | 9000    | 12000   |
| Площадь зеркала осаждения, м <sup>2</sup>                                         | 19,6  | 63,8    | 113,0   |
| Крупность исходного питания, мм                                                   | 0-0,5 | 0-0,5   | 0-0,5   |
| Индукция магнитного поля в середине рабочего зазора намагничивающих аппаратов, Тл | 0,05  | 0,05    | 0,05    |
| Производительность по твёрдому, т/ч                                               | 45-50 | 110-190 | 200-350 |
| Установленная мощность привода гребковой рамы, кВт                                | 2,8   | 14      | 18      |
| Масса без электродвигателя, т                                                     | 9,8   | 17,9    | 19,5    |

При дешламации обеспечивается прирост массовой доли железа в сгущённом продукте по сравнению с исходным продуктом от 0,3 до 10 %. Выход слива (шламов) составляет до 20 % с массовой долей железа магнетитового в нём до 2-3 %. Удельная производительность на 1 м<sup>2</sup> площади зеркала сгущения составляет 1-5 т/(ч·м<sup>2</sup>), что значительно выше, чем у обычных сгустителей. Содержание твёрдого в питании составляет 10-40 %, в сгущённом продукте – 30-60 %, в сливе – 0,3-10 %.

Для обесшламливания магнетитовых пульп разработан магнитный гидроциклон, принципиально отличающийся от обычного гидроциклона наличием намагничивающих устройств на входе пульпы в гидроциклон и на входе слива в сливной патрубок [19, 69]. Магнитные гидроциклоны не получили промышленного применения.

#### *Намагничивающие аппараты*

Предварительная магнитная обработка магнетитовых руд и промпродуктов может применяться с целью повышения извлечения магнетита в магнитный продукт и снижения массовой доли магнетита в хвостах. При этом предварительное намагничивание продукта даёт положительный эффект как при сухой, так и при мокрой магнитной сепарации.

Для предварительного намагничивания дроблёной магнетитовой руды в основном использовались магнитные системы из постоянных магнитов, устанавливаемые под несущей ветвью питающего конвейера, под питателем и др.

Для шкивных сепараторов намагничивающие системы устанавливались под несущей ветвью ленты между магнитным и натяжным барабанами [41].

Использование предварительного намагничивания позволяет несколько увеличить производительность магнитных сепараторов. По данным работы [35], предварительное намагничивание мелкодроблённой руды позволяет снизить массовую долю железа в хвостах сухой магнитной сепарации на 0,1-0,4 %.

Для предварительного намагничивания пульп (измельчённой магнетитовой руды) в сепараторах ПБМ и ПБМ-П можно устанавливать магнитные флокуляторы – плоские магнитные системы из постоянных магнитов. Кроме этого, разработаны намагничивающие аппараты, состоящие из патрубка и магнитной системы, создающей магнитное поле с индукцией 0,05-0,1 Тл. Магнитная система устанавливается снаружи патрубка, иногда – внутри патрубка. Для намагничивания применялись как электромагнитные системы, так и системы из постоянных магнитов.

Для избирательной магнитной флокуляции В. И. Кармазиным, В. В. Кармазиным и др. 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 состоит из немагнитного патрубка, на котором установлены катушки с увеличивающимся числом витков в направлении движения материала. Индукция магнитного поля возрастает от 0 до 0,05 Тл. Для периодического разрушения образовавшихся флокул внутри патрубка установлен турбулятор, выполненный в виде вращающегося стержня с лопатками [19, 21, 25].

В институте «Уралмеханобр» разработан ряд конструкций намагничивающих устройств и флокуляторов для пульп. Испытание одного из разработанных устройств на обогатительной фабрике Качканарского ГОКа показало возможность снижения массовой доли железа в хвостах операции ММС-I на 0,2-0,4 % [35].

Применение предварительного намагничивания магнетитовых руд и пульп с целью снижения потерь железа с хвостами обогащения в настоящее время потеряло свою актуальность в связи с появлением барабанных сепараторов с повышенной индукцией магнитного поля за счёт использования постоянных магнитов из Nd-Fe-B. В табл. 4.14 приведены результаты промышленных испытаний барабанных сепараторов для сухого и мокрого обогащения с раз-

личным значением индукции магнитного поля на обогатительной фабрике Качканарского ГОКа.

Таблица 4.14

Результаты применения сепараторов с различной индукцией магнитного поля

| Сепаратор                          | Индукция магнитного поля, Тл | Крупность питания, мм | Массовая доля в хвостах, % |                      |
|------------------------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------|
|                                    |                              |                       | железа                     | железа магнетитового |
| Сухая магнитная сепарация (СМС)    |                              |                       |                            |                      |
| 2ПБС-90/250                        | 0,16                         | 10-25                 | 6,0                        | 2,2                  |
| 2ПБС-90/250А                       | 0,24                         | 0-25                  | 4,8                        | 1,0                  |
| Мокрая магнитная сепарация (ММС-I) |                              |                       |                            |                      |
| ПБМ-П-150/200                      | 0,14                         | 0-3                   | 5,6                        | 0,58                 |
| ПБМ-П-150/200-2                    | 0,20                         | 0-3                   | 5,5                        | 0,42                 |
| ПБМ-П-150/200А                     | 0,25                         | 0-3                   | 5,4                        | 0,33                 |

Повышение индукции магнитного поля сепараторов до 0,25 Тл позволяет снизить массовую долю железа магнетитового в хвостах обогащения при сухом обогащении на 1-1,2 %, а при мокром обогащении – на 0,25 %.

Приведённые в табл. 4.14 результаты показывают, что увеличение индукции магнитного поля сепараторов позволяет снизить массовую долю железа общего и магнетитового на большую величину, по сравнению с применением предварительного намагничивания (особенно при сухом обогащении). Поэтому в настоящее время намагничивающие аппараты в основном применяются только в магнитных дешламаторах. При мокром магнитном обогащении предварительное намагничивание пульпы с помощью флокуляторов следует использовать при низкой массовой доле сильномагнитных частиц в питании сепаратора.

#### *Размагничивающие аппараты*

Для дефлокуляции пульп перед процессами классификации и фильтрования применяют размагничивающие аппараты. Размагничивающие аппараты (рис. 4.20, а) состоят из патрубка 1, на котором установлены катушки 2, создающие переменное магнитное поле с уменьшающейся индукцией магнитного поля по ходу движения материала и из корпуса 3.

При размагничивании пульпа движется по патрубку и пересекает переменное и уменьшающееся по направлению до нуля магнитное поле. В результате намагниченные частицы магнетита и титаномагнетита размагничиваются и разъединяются на отдельные частицы (происходит разрушение флоккул).

Максимальная эффективность применения предварительного размагничивания пульпы перед классификацией по крупности достигается при обогащении магнитножесткого титаномагнетита и магнетита.

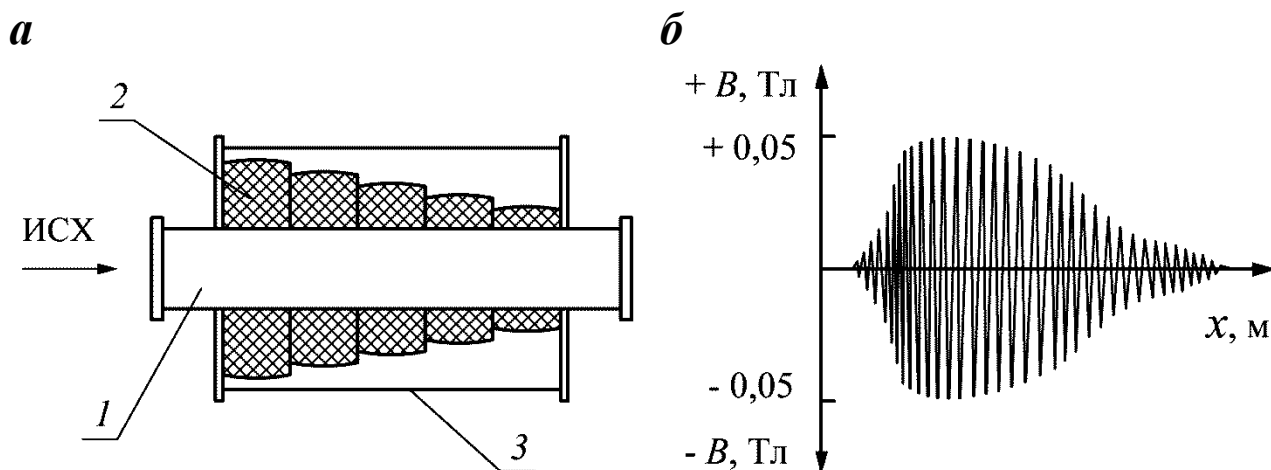


Рис. 4.20. Размагничивающий аппарат РА-4:

*а* – принципиальная конструкция: 1 – патрубок из немагнитного материала; 2 – катушки; 3 – корпус; *б* – характеристика магнитного поля вдоль оси патрубка

Приведённые в табл. 3.5 результаты промышленных испытаний на обогатительной фабрике Качканарского ГОКа, перерабатывающего титаномагнетитовую руду, показывают, что использование размагничивающих аппаратов приводит к получению слива с большим содержанием класса -71 мкм и к получению песков с меньшим содержанием этого класса. Эффективность классификации увеличивается с 22 до 42 %. Аналогичные результаты получены при сравнительных испытаниях по применению размагничивающих аппаратов на Абагурской обогатительной фабрике [4].

Технические характеристики размагничивающих аппаратов приведены в табл. 4.15.

Таблица 4.15

#### Технические характеристики аппаратов размагничивающих АР

| Параметры                                                | АР-50<br>(178-СЭ) | АР-75<br>(158-СЭ) | АР-100<br>(177-СЭ) | АР-150<br>(165-СЭ) | АР-200<br>(176-СЭ) | АР-450<br>(225-СЭ) |
|----------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Диаметр трубы пульпопровода, мм                          | 50                | 75                | 100                | 150                | 200                | 450                |
| Максимальная индукция магнитного поля на оси трубы, Тл   | 0,05              | 0,05              | 0,05               | 0,05               | 0,05               | 0,045              |
| Мощность переменного тока, кВт                           | 2,1               | 2,8               | 5,1                | 6,3                | 11,0               | 70,0               |
| Объёмная производительность по пульпе, м <sup>3</sup> /ч | 25                | 54                | 85                 | 180                | 300                | 1500               |
| Габаритные размеры, мм:                                  |                   |                   |                    |                    |                    |                    |
| - длина                                                  | 930               | 970               | 1050               | 1080               | 1440               | 1600               |
| - ширина                                                 | 458               | 506               | 574                | 635                | 635                | 1000               |
| - высота                                                 | 492               | 543               | 608                | 670                | 670                | 980                |
| Масса аппарата, кг                                       | 124               | 172               | 266                | 309                | 345                | 475                |

При использовании размагничивания перед фильтрованием магнетитовых и титаномagnetитовых концентратов уменьшается влажность кека на 0,4-0,5 % (см. табл. 3.6). Внутри магнетитовой флоккулы между частицами магнетита находится вода, не полностью удаляемая при фильтровании. Если концентрат перед фильтрованием размагнитить, то влага, которая находилась внутри флоккулы, будет удалена вакуум-фильтром.

Размагничивающие аппараты также применяются для размагничивания магнетита и ферросилиция перед приготовлением суспензий для гравитационных тяжёлосредных сепараторов.

#### **4.9. Феррогидростатические сепараторы**

Основными элементами ФГС-сепараторов являются: узел загрузки исходного продукта; зона разделения, выполняемая в виде кюветы, заполненной ферромагнитной жидкостью; электромагнитная система с двумя полюсными наконечниками, как правило, гиперболической формы и с одним нейтральным полюсом – пластиной или система из постоянных магнитов; устройства для разгрузки тяжелой и легкой фракций.

По состоянию рабочего слоя магнитной жидкости в межполюсном зазоре электромагнита ФГС-сепараторы можно разделить на три группы.

1. С использованием взвешенного рабочего слоя магнитной жидкости. В данном случае ФМЖ удерживается между полюсами сепаратора магнитной силой. Тяжелые частицы, проходя сквозь магнитную жидкость, попадают в воздушный зазор и разгружаются в свой приемник.

2. С применением рабочего слоя магнитной жидкости с гидравлическим подпором. Тяжелые частицы, проходя сквозь магнитную жидкость, попадают в воду и разгружаются, например, с помощью элеватора.

3. С механическим подпором рабочего слоя магнитной жидкости. При этом магнитная жидкость заливается в ванну (кювету) и контактирует с её дном. Тяжелые частицы, проходя сквозь магнитную жидкость, попадают на дно ванны и разгружаются в свой приемник вибрационным способом или с помощью разгрузочного лотка, установленного на дне ванны (рис. 4.21 и 4.22).

Подача исходного продукта в ФГС-сепараторы в основном осуществляться непосредственно на поверхность ФМЖ. Может быть осуществлена подача исходного продукта в объём ФМЖ.

### ФГС-сепараторы с электромагнитной системой

К феррогидростатическим сепараторам относятся сепараторы ФГС-1 и ФГС-70, имеющие одинаковую принципиальную конструкцию (см. рис. 4.21). Технические характеристики сепараторов приведены в табл. 4.16.

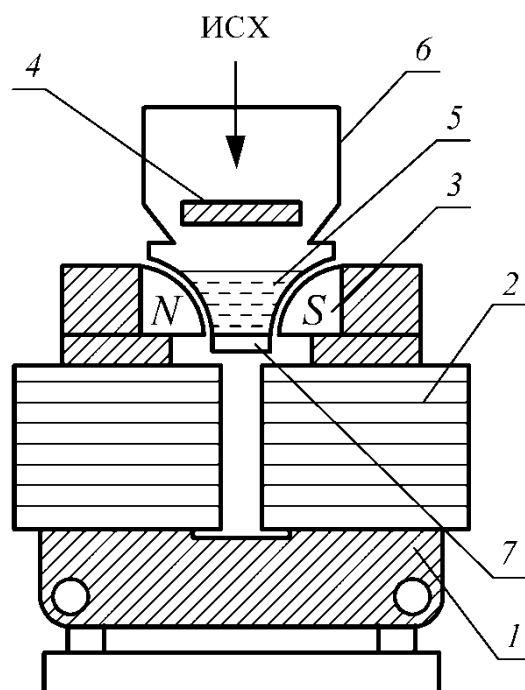


Рис. 4.21. Принципиальная конструкция сепараторов ФГС-1 и ФГС-70:

1 – магнитопровод; 2 – обмотки возбуждения; 3 – полюсные наконечники; 4 – дополнительный полюс; 5 – ванна с ферромагнитной жидкостью; 6 – бункер исходного продукта; 7 – лоток

Электромагнитная система сепаратора состоит из магнитопровода 1, обмоток возбуждения 2, полюсных наконечников 3, имеющих гиперболический профиль, и дополнительного полюса-пластины 4 для создания изодинамического магнитного поля в рабочей зоне разделения сепаратора. Конструкция полюсных наконечников обеспечивает возможность регулировки межполюсного зазора. Плотность разделения (эффективная плотность) сепараторов составляет от 2000 до 12000 кг/м<sup>3</sup> в зависимости от силы тока, величины межполюсного зазора и плотности ФМЖ (см. рис. 2.15). Максимальная индукция магнитного поля составляет 0,4 и 0,5 Тл соответственно для сепараторов ФГС-1 и ФГС-70.

Сепаратор ФГС-1 работает следующим образом.

Разделяемые частицы из бункера 6 поступают в ванну 5, заполненную ферромагнитной жидкостью. Частицы, плотность которых выше эффективной плотности ФМЖ, осаждаются на дно лотка 7, который извлекают из кюветы для разгрузки тяжелого продукта.

Частицы, плотность которых ниже эффективной плотности ФМЖ, движутся по поверхности жидкости в сторону уклона магнитной системы (4°) и скатываются по ее торцевой поверхности, попадая в ёмкость для сбора легкого продукта. Положение верхнего уровня слоя ФМЖ в межполюсном зазоре должно быть на 10-20 мм ниже верхней плоскости полюсных наконечников.

Перед разделением необходимо из исходного продукта предварительно выделить магнитную фракцию.

Таблица 4.16

## Технические характеристики сепараторов ФГС с электромагнитной системой

| Параметры                                                                           | ФГС-1           | ФГС-70    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------|
| Крупность разделяемого материала, мм                                                | 0,1-25          | 2,5-25    |
| Производительность, кг/ч                                                            | 60              | 1000-2000 |
| Режим работы                                                                        | Продолжительный |           |
| Точность поддержания эффективной плотности ФМЖ в зоне разделения, кг/м <sup>3</sup> | -               | ± 200     |
| Потребляемая мощность, кВт, не более                                                | 3               | 10        |
| Индукция магнитного поля, Тл                                                        | 0,4             | 0,5       |
| Габаритные размеры, мм:                                                             |                 |           |
| длина                                                                               | 900             | 2300      |
| ширина                                                                              | 650             | 2000      |
| высота                                                                              | 1100            | 2500      |
| Масса сепаратора, кг                                                                | 1200            | 5000      |

Эффективная плотность ФМЖ в зависимости от её физической плотности и силы тока выбирается по специальным графикам (см. рис. 2.15), имеющимся в инструкции по эксплуатации. Ферромагнитную жидкость лучше использовать с меньшей физической плотностью, так как при высокой плотности повышается вязкость, что сказывается на эффективности разделения материала и ухудшает последующий отмыв продуктов от ФМЖ.

Сепаратор ФГС-70 имеет большие размеры зоны разделения и большую производительность по сравнению с сепаратором ФГС-1. На базе сепаратора ФГС-70 разработана установка по разделению вторичных цветных металлов. Принцип разделения в сепараторе ФГС-70 аналогичен принципу разделения в сепараторе ФГС-1.

*ФГС-сепараторы с системами из постоянных магнитов*

Феррогидростатические сепараторы с системой из редкоземельных постоянных магнитов (Nd-Fe-B), по сравнению с ФГС-сепараторами с электромагнитными системами, имеют более простую конструкцию, меньшую массу и меньший расход электроэнергии. Однако в этих сепараторах эффективная плотность ФМЖ сильнее изменяется в горизонтальном направлении (возрастает сверху вниз по мере уменьшения межполюсного зазора (см. рис. 2.18), по сравнению с ФГС-сепараторами с электромагнитными системами. Поэтому разработанные ФГС-сепараторы с системами из постоянных магнитов в основном применяются для разделения смесей с большой разницей в плотностях частиц, например, для извлечения золота из труднообогатимых промпродуктов.

При этом разница в плотностях разделяемых частиц должна быть выше изменения эффективной плотности ФМЖ в рабочей зоне сепаратора.

Феррогидростатические сепараторы с системой из редкоземельных постоянных магнитов выпускают компании «Грант» (г. Наро-Фоминск) и НПП «Геос» (г. Владикавказ).

На рис. 4.22 приведена принципиальная конструкция вибрлоткового ФГС-сепаратора (НПП «Геос»). В сепараторе использована клиновидная двух-полюсная магнитная система, состоящая из магнитопровода 1 и полюсов 2 (постоянных магнитов из Nd-Fe-B). Угол между полюсами может составлять 90-120°. Индукция магнитного поля 0,4-0,8 Тл.

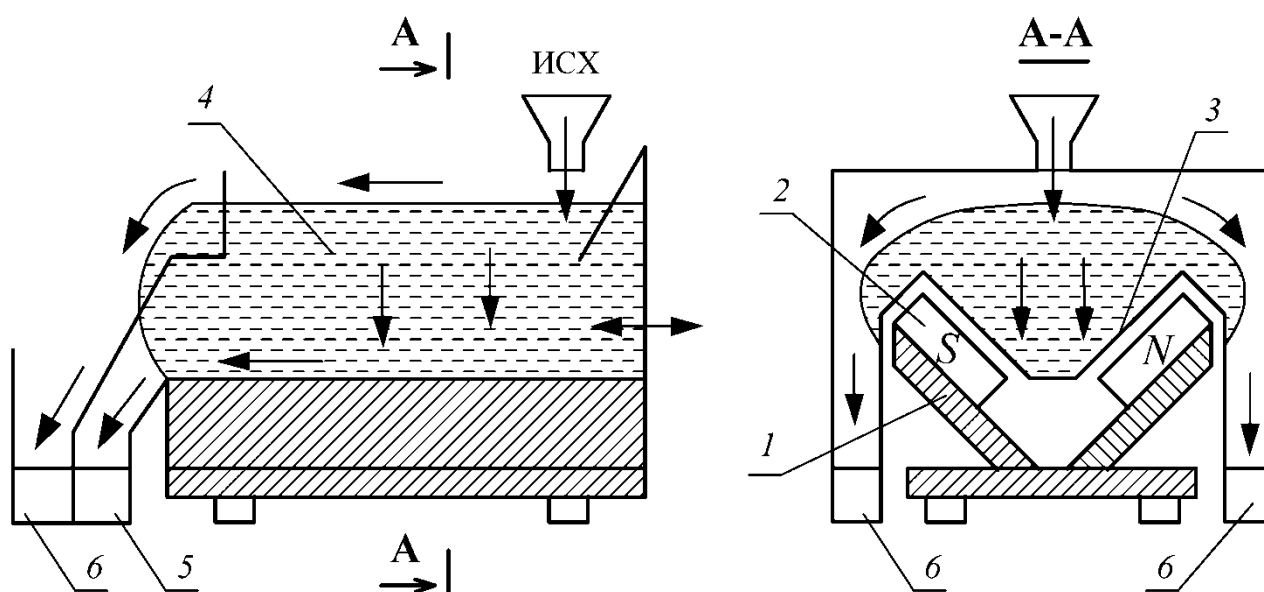


Рис. 4.22. Принципиальная конструкция вибрлоткового ФГС-сепаратора:

1 – магнитопровод; 2 – полюса из постоянных магнитов; 3 – лоток (ванна); 4 – ферромагнитная жидкость; 5 – приёмник тяжёлой фракции; 6 – бункер лёгкого продукта

Сепаратор работает следующим образом. Разделяемые частицы из загрузочной воронки поступают в лоток 3, заполненный ферромагнитной жидкостью. Частицы, плотность которых ниже эффективной плотности ФМЖ, движутся по поверхности жидкости в сторону её уклона и попадают в ёмкости для сбора легкого продукта. Частицы, плотность которых выше эффективной плотности ФМЖ, осаждаются на дно лотка. Лоток совершает возвратно-поступательные движения, благодаря чему тяжёлые частицы движутся по дну лотка в сторону разгрузки.

Кроме вибрлоткового сепаратора компанией НПП «Геос» разработаны другие типы ФГС-сепараторов – барабанный и центробежный сепараторы, сепаратор отклоняющего типа [42, 44, 49].

Перед разделением материала в ФГС-сепараторе необходимо из исходного продукта предварительно выделить магнитную фракцию. Поэтому в модульных сепарационных комплексах перед ФГС-сепараторами устанавливают магнитные сепараторы для последовательного удаления сильномагнитных и слабомагнитных частиц.

Практика промышленного применения ФГС-сепараторов с системой из постоянных магнитов показала их высокую эффективность при обогащении труднообогатимых золотосодержащих промпродуктов и хвостов гравитационного обогащения [21].

#### **4.10. Электродинамические сепараторы**

В электродинамических сепараторах осуществляется выделение электропроводных частиц из движущегося потока материала под воздействием переменного магнитного поля с целью отделения их от неэлектропроводных частиц.

Нижний предел крупности извлекаемых электропроводных частиц составляет 1-5 мм.

В зависимости от источников магнитного поля и условий его воздействия на сепарируемый материал электродинамические сепараторы можно разбить на четыре группы [51, 74].

1. Сепараторы с переменным магнитным полем с использованием линейных асинхронных двигателей. Индуктор с обмоткой расположен неподвижно по отношению к сепарируемому материалу. Электропроводные частицы извлекаются, как правило, в направлении, перпендикулярном движению потока материала в плоскости перемещения материала.

2. Сепараторы с переменным (бегущим) магнитным полем, создаваемым вращающейся магнитной системой в основном из постоянных магнитов из Nd-Fe-B, помещенной в барабан. Материал перемещается в рабочей зоне по криволинейной поверхности (наружный барабан, криволинейная плоскость), а отклонение электропроводных частиц происходит в направлении вращения магнитной системы.

3. Сепараторы с постоянным магнитным полем (источник – постоянные магниты) в виде неподвижных наклонных желобов, лотков, плит, кольцевых

поверхностей, по которым самотёком движется разделяемый материал над неподвижной магнитной системой. Переменное магнитное поле создается при перемещении материала относительно неподвижной магнитной системы с чередованием полярности под углом к направлению движения разделяемых частиц.

4. Сепараторы с переменным магнитным полем (источник – электромагниты различных типов, питаемые переменным током).

Наибольшее промышленное применение получили электродинамические сепараторы с использованием линейных асинхронных двигателей и, особенно – сепараторы с бегущим магнитным полем, создаваемым вращающейся магнитной системой из постоянных магнитов.

*Сепараторы с переменным магнитным полем с использованием линейных асинхронных двигателей*

Основным элементом этих типов сепараторов является линейный асинхронный двигатель или индуктор. Бегущее магнитное поле создается переменным трехфазным током при смещении фаз обмотки относительно друг друга.

На рис. 4.23, *а* приведена принципиальная конструкция электродинамического сепаратора с использованием линейного асинхронного двигателя.

Сепаратор работает следующим образом. Исходный материал при помощи питателя 1 монослойно подается на конвейерный транспортер, который транспортирует его в зону разделения. Линейный асинхронный двигатель 3 расположен под транспортером и максимально приближен к конвейерной ленте 2, то есть к разделяемому материалу для обеспечения высоких значений магнитной силы и силы Ампера. По этой же причине толщину ленты выбирают минимальной. Пазы индуктора расположены вдоль конвейерной ленты с чередованием полярности полюсов и направлением бегущего магнитного поля поперек движению ленты и материала. Электропроводные частицы под действием силы Ампера перемещаются под углом к основному потоку в направлении бегущего магнитного поля и разгружаются в приемник 4, неэлектропроводные частицы сходят с конвейера и попадают в свой приемник.

Для повышения эффективности разделения в одном аппарате могут использоваться два плоских индуктора бегущего магнитного поля – основной под конвейерной лентой, дополнительный индуктор над конвейерной лентой. Бегущее магнитное поле верхнего индуктора может быть направлено навстречу движению материала для предварительного торможения электропроводных частиц или совпадать с направлением бегущего магнитного поля нижнего индуктора для усиления силового воздействия на электропроводные частицы.

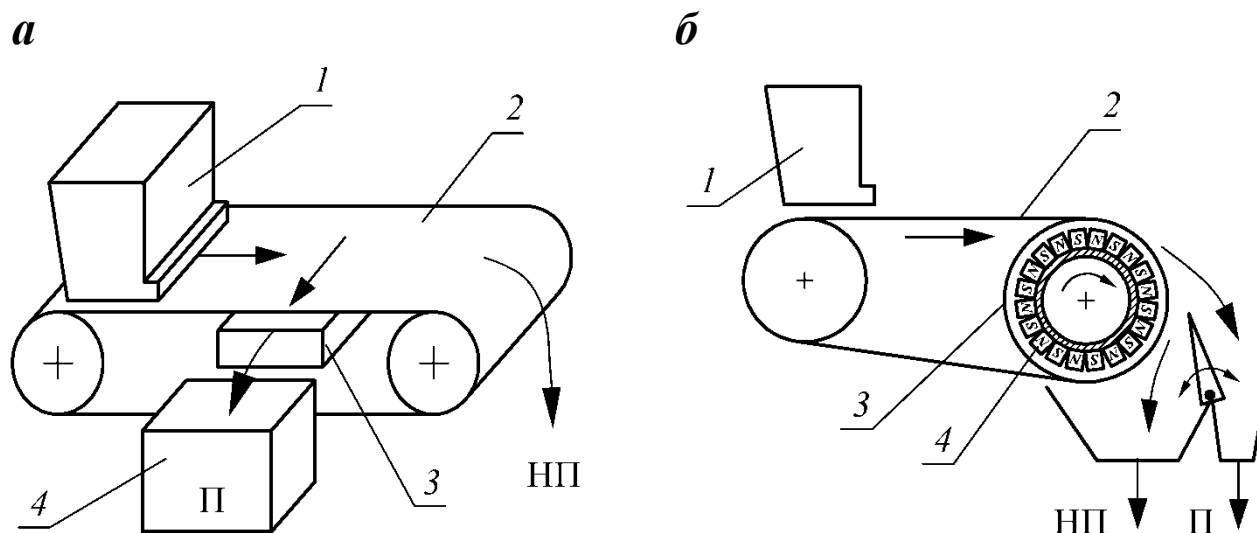


Рис. 4.23. Принципиальные конструкции электродинамических сепараторов:

*а* – сепаратор с использованием линейного асинхронного двигателя:

1 – бункер-питатель; 2 – бесконечная лента; 3 – линейный асинхронный двигатель; 4 – приёмник частиц-проводников;

*б* – сепаратор с вращающейся магнитной системой из постоянных магнитов:

1 – бункер-питатель; 2 – бесконечная лента; 3 – барабан; 4 – вращающаяся магнитная система

В одной установке могут быть использованы несколько последовательно установленных извлекающих индукторов бегущего магнитного поля для увеличения извлечения электропроводных частиц. Для перемещения исходного материала над линейным асинхронным двигателем может применяться вибролоток.

*Сепаратор с переменным магнитным полем с вращающейся магнитной системой из постоянных магнитов*

Основным элементом этих типов сепараторов является вращающаяся магнитная система из постоянных магнитов из Nd-Fe-B. Переменное (бегущее) магнитное поле создается при перемещении разноимённых полюсов магнитной системы относительно движущихся с меньшей скоростью частиц. Частота переменного магнитного поля в современных сепараторах более 200 Гц.

На рис. 4.23, *б* приведена принципиальная конструкция электродинамического сепаратора шкивного типа с вращающейся магнитной системой.

Сепаратор работает следующим образом. Исходный материал при помощи питателя 1 монослойно подается на конвейерный транспортер, который транспортирует его в зону разделения. В медленно вращающемся приводном барабане 3 с более высокой линейной скоростью вращается многополюсная магнитная система 4, создающая бегущее магнитное поле. Толщина ленты

транспортёра 2 выбирается минимальной. Электропроводные частицы под действием силы Ампера отклоняются из основного потока в направлении бегущего магнитного поля и разгружаются в свой приемник. Неэлектропроводные частицы сходят с конвейера и попадают в свой приемник.

Аналогичную конструкцию имеет сепаратор, приведённый на рис. 1.1, *е*. В этом сепараторе исходные частицы движутся в зону разделения самотёком по наклонной плоскости. Для снижения расстояния между магнитной системой и разделяемыми частицами используют подачу исходного продукта с помощью вибропитателя непосредственно на барабан. Это позволяет увеличить магнитную силу и силу Ампера и снизить нижний предел крупности разделяемых частиц.

В табл. 4.17 приведены технические характеристики электродинамических сепараторов шкивного типа СМВТ-ВП с вращающейся магнитной системой компании «Эрга» (г. Калуга) [79]. Эти сепараторы предназначены для обогащения материала крупностью от 5 до 150 мм.

Таблица 4.17

Технические характеристики электродинамических сепараторов «Эрга»

| Марка сепаратора | Индукция магнитного поля, Тл | Производительность, м <sup>3</sup> /ч | Потребляемая мощность, кВт | Габаритные размеры, мм | Масса, кг |
|------------------|------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|------------------------|-----------|
| СМВТ-ВП-400      | 0,4                          | 3,0                                   | 3,0                        | 3010x1350x980          | 400       |
| СМВТ-ВП-800      | 0,4                          | 5,0                                   | 4,0                        | 3010x1750x980          | 800       |
| СМВТ-ВП-1000     | 0,4                          | 6,5                                   | 5,0                        | 3010x1950x980          | 1200      |
| СМВТ-ВП-1200     | 0,4                          | 8,0                                   | 6,0                        | 3010x2250x980          | 1400      |
| СМВТ-ВП-1500     | 0,4                          | 100                                   | 8,5                        | 3010x2550x980          | 1600      |

Компания «Эрга» (г. Калуга) разработала опытный образец барабанного электродинамического сепаратора типа СМБ-ДМ. В этом сепараторе исходный продукт подаётся с помощью вибропитателя непосредственно на барабан. В сепараторе использована многополюсная вращающаяся магнитная система из постоянных магнитов с повышенной индукцией поля (1,2 Тл) и увеличенной частотой вращения [79].

#### 4.11. Лабораторные магнитные сепараторы

Лабораторное оборудование используется в научных организациях при исследовании руд на обогатимость в основном при разработке технологической схемы нового проектируемого предприятия и для оценки возможности приме-

нения новых технических и технологических решений на существующем предприятии.

В высших учебных заведениях лабораторные магнитные сепараторы дополнительно используются в учебных целях для проведения практических занятий со студентами с целью освоения студентами методик проведения экспериментальных исследований, изучения конструкций магнитных сепараторов и закрепления знаний теоретического курса «Магнитные и электрические методы обогащения».

На горно-обогатительных комбинатах для магнитного анализа (определения показателя обогатимости) как текущей руды, так и керновых проб разведочного бурения при технологическом картировании месторождения широко применяются магнитные анализаторы. Магнитный анализ выполняется в соответствии с ГОСТ-25114-82 или по техническим условиям, разработанным предприятием применительно к обогащаемой магнетитовой руде. Наиболее часто применяемым анализатором является трубчатый анализатор 25Т-СЭМ. Также используется магнитный анализатор АМ-2А с комбинированным постоянным и переменным магнитным полем компании «НТЦ Магнис ЛТД».

Магнитный анализ с применением трубчатого анализатора выполняется для сильномагнитных руд. Масса исходной пробы зависит от содержания в ней магнетита (в среднем 50 г). Основными элементами трубчатого анализатора являются стеклянная трубка 4 и электромагнитная система, состоящая из обмоток возбуждения 1, магнитопровода 2 и полюсных наконечников 3 (рис. 4.24, а).

При магнитном анализе исходный материал с водой подают в трубку, совершающую возвратно-поступательные движения в межполюсном зазоре. Немагнитные частицы вместе с водой разгружаются через отверстие в нижней части трубки. Магнитные частицы 5 заполняют межполюсный зазор, притягиваясь к полюсам электромагнита (см. рис. 4.24, а). В трубке поддерживается постоянный расход и уровень воды выше полюсных наконечников. После разгрузки немагнитных частиц отключается ток питания электромагнита и разгружается магнитная фракция. После проведения магнитного анализа определяют технологические показатели обогащения.

Мокрый магнитный анализ слабомагнитных руд выполняют на анализаторах, аналогичных трубчатому анализатору, но вместо трубки в зазор между полюсами устанавливают неподвижную ячейку, заполненную ферромагнитными телами. В этом случае оценивается возможность применения высокоградиентной сепарации.

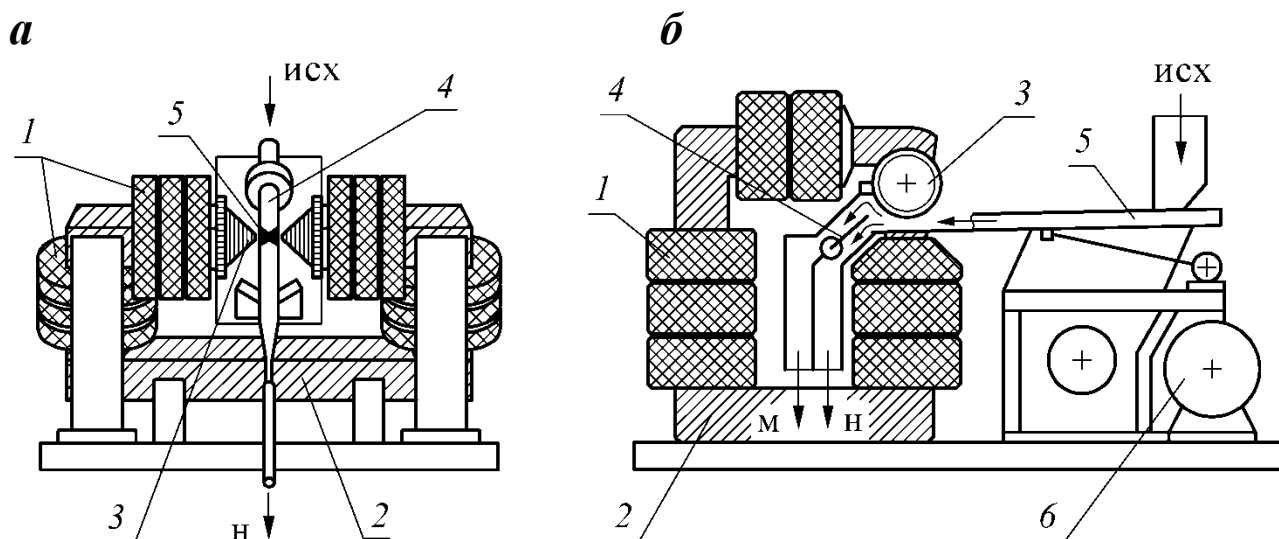


Рис. 4.24. Лабораторные магнитные анализаторы (сепараторы):

*а* – трубчатый анализатор 25Т-СЭМ: 1 – обмотки возбуждения; 2 – магнитопровод; 3 – полюсные наконечники; 4 – трубка; 5 – магнитная фракция;

*б* – роликовый сепаратор СЭ-138Т: 1 – обмотки возбуждения; 2 – магнитопровод; 3 – ролик; 4 – шибер; 5 – вибрлоток; 6 – электропривод

Для экспресс-оценки наличия в исследуемой пробе магнитных частиц применяются ручные магниты в чехле (РМЧ) с различной индукцией магнитного поля постоянных магнитов.

Для магнитной сепарации малых технологических проб в СССР были разработаны лабораторные магнитные сепараторы различных конструкций, применяющиеся и в настоящее время. Для сухой и мокрой магнитной сепарации сильномагнитных руд применяются, например, барабанные сепараторы, соответственно ПБС-40/10 (235-СЭ) и 120Т-СЭМ. Для магнитной сепарации слабомагнитных руд применяются, например, роликовый сепаратор СЭ-138Т (сухое обогащение,  $B_{\max}=1,4$  Тл) и роликовый сепаратор СЭМ-1 (сухое и мокрое обогащение,  $B_{\max}=2$  Тл).

Принципиальная конструкция роликового сепаратора СЭ-138Т приведена на рис. 4.24, *б*. Основными элементами сепаратора являются валок 3 с зубцами треугольного сечения и электромагнитная система, состоящая из обмоток возбуждения 1 и магнитопровода 2. Принцип разделения в сепараторе СЭ-138Т аналогичен принципу разделения в промышленных валковых сепараторах с нижней подачей материала для сухого обогащения типа ЭВС.

В России современное лабораторное оборудование для магнитного обогащения выпускает НПК «Механобр-Техника» [78]. Также лабораторное оборудование выпускают компании «ИТОМАК» (г. Новосибирск) [82], «Грант» (г. Наро-Фоминск) [83] и другие.

В табл. 4.18 приведены основные технические характеристики лабораторных магнитных сепараторов НПК «Механобр-Техника» [78].

Таблица 4.18

Основные технические характеристики лабораторных магнитных сепараторов, выпускаемых НПК «Механобр-Техника» [78]

| Параметры                                               | Сепараторы для обогащения сильномагнитных руд |              |           |                               |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|-----------|-------------------------------|
|                                                         | ПБСЦ-30/5                                     | ПБСЦ-40/10   | ЭБМ-32/20 | 298 СЭ (трубчатый анализатор) |
| Способ обогащения                                       | Сухой                                         | Сухой        | Мокрый    | Мокрый                        |
| Производительность, т/ч                                 | До 0,1                                        | До 0,5       | До 0,075  | -                             |
| Крупность питания, мм                                   | До 6,0                                        | До 6,0       | До 3,0    | До 0,5                        |
| Индукция магнитного поля, Тл                            | 0,30 (0,14)*                                  | 0,30 (0,14)* | До 0,13   | До 0,2                        |
| Мощность привода, кВт                                   | 0,55                                          | 0,55         | 0,37      | 0,13                          |
| Мощность, потребляемая электромагнитной системой, кВт/ч | -                                             | -            | До 0,7    | До 0,4                        |
| Габаритные размеры, мм:                                 |                                               |              |           |                               |
| – длина                                                 | 370                                           | 580          | 690       | 970                           |
| – ширина                                                | 570                                           | 1000         | 714       | 720                           |
| – высота                                                | 800                                           | 1172         | 638       | 770                           |
| Масса, кг                                               | 100                                           | 273          | 155       | 170                           |
| Параметры                                               | Сепараторы для обогащения слабомагнитных руд  |              |           |                               |
|                                                         | ПВ-30/10                                      | ЭВС-10/5     | ЭВС-28/9  | ЭБМ-28/9                      |
| Способ обогащения                                       | Сухой (мокрый)                                | Сухой        | Сухой     | Мокрый                        |
| Производительность, т/ч                                 | До 0,4                                        | До 0,005     | До 0,5    | До 0,4                        |
| Крупность питания, мм                                   | До 8,0                                        | До 2,0       | До 6,0    | До 5,0                        |
| Индукция магнитного поля, Тл                            | 1,0                                           | До 1,7       | До 1,7    | До 1,7                        |
| Мощность привода, кВт                                   | 1,1                                           | 0,18         | 1,5       | 0,75                          |
| Мощность, потребляемая электромагнитной системой, кВт/ч | -                                             | До 0,5       | До 0,8    | До 0,8                        |
| Габаритные размеры, мм:                                 |                                               |              |           |                               |
| – длина                                                 | 950                                           | 540          | 850       | 880                           |
| – ширина                                                | 660                                           | 340          | 1500      | 1100                          |
| – высота                                                | 1830                                          | 570          | 1850      | 1520                          |
| Масса, кг                                               | 220                                           | 75           | 1100      | 820                           |

\* Индукция магнитного поля приведена на поверхности барабана: первое значение – при использовании магнитов из Ва-Fe; значение в скобках – при использовании магнитов из Nd-Fe-B.

Особенностью сепараторов ПБСЦ-30/5 и ПБСЦ-40/10 является привод с возможностью использования преобразователя частоты тока для плавной регулировки линейной скорости вращения барабана, являющейся одним из главных факторов, влияющих на показатели разделения в барабанных сепараторах с верхней подачей материала. Кроме этого, сепараторы ПБСЦ-30/5 и ПБСЦ-40/10

могут комплектоваться барабанами с различной индукцией магнитного поля. При этом появляется возможность иметь один сепаратор со сменными барабанами.

Сепаратор ПВ-30/10 предназначен как для сухого, так и для мокрого обогащения. Валок сепаратора состоит из чередующихся кольцеобразных постоянных магнитов из Nd-Fe-B и шайб из магнитномягкого материала (см. рис. 4.13, а), что позволяет достичь высокого значения индукции магнитного поля (1 Тл). Удаление магнитного продукта с поверхности вала осуществляется с помощью вращающейся щётки. Привод вала может комплектоваться преобразователем частоты тока для плавной регулировки линейной скорости вращения вала.

Валковый сепаратор ЭВС-10/5 по сравнению с ранее выпускавшимся роликовым сепаратором СЭ-138Т имеет уменьшенные габаритные размеры и массу и большую индукцию магнитного поля.

Валковые сепараторы ЭВС-28/9 и ЭВМ-28/9 по сравнению с другими лабораторными сепараторами имеют более высокую производительность (более 100 кг/ч), что позволяет использовать их не только для лабораторных, но и для укрупнённых лабораторных и полупромышленных испытаний на непрерывно действующей обогатительной установке.

Лабораторные магнитные сепараторы используются не только для выполнения исследований обогатимости руд, но и для апробации в лабораторных условиях новых технических решений в сепараторостроении. Поэтому кроме серийно выпускаемых лабораторных сепараторов изготавливаются отдельные опытные малогабаритные образцы аппаратов, которые испытываются в лабораториях и могут в дальнейшем являться прототипами новых промышленных магнитных сепараторов.

#### **4.12. Производительность магнитных сепараторов**

Производительность магнитного сепаратора рассчитывается для определения количества сепараторов в конкретной обогатительной операции.

Расчётное количество ( $N_p$ ) любого типа проектируемого магнитного сепаратора определяется по формуле

$$N_p = Q_{\text{исх}} / Q_{\text{сеп}}, \quad (4.1)$$

где  $Q_{\text{исх}}$  – производительность обогатительной операции, т/ч;  $Q_{\text{сеп}}$  – расчётная или паспортная производительность одного сепаратора, т/ч.

Принятое количество проектируемого типа магнитных сепараторов ( $N_{пр}$ ) определяется путём округления величины  $N_p$  в большую сторону.

В дальнейшем рассчитывают коэффициент загрузки ( $k_3$ ) магнитных сепараторов в обогатительной операции:

$$k_3 = N_p / N_{пр}. \quad (4.2)$$

Коэффициент загрузки  $k_3$  должен находиться в диапазоне от 0,75 до 1,0. Если меньше 0,75, то возможно использование сепараторов меньшего типоразмера (с меньшей единичной производительностью).

Однако величину  $k_3=0,75-1,0$  следует рассматривать как рекомендуемую. При проектировании обогатительной фабрики часто величину  $k_3$  принимают меньшей, исходя из особенностей компоновки оборудования и его эксплуатации. Перечислим некоторые из этих особенностей.

1. Для одной обогатительной фабрики следует стремиться к использованию сепараторов одного типоразмера, что снижает затраты на обслуживание и ремонт сепараторов. Например, при мокром обогащении магнетитовых руд лучше использовать все сепараторы с одним размером барабана, так как барабаны прямооточных, противоточных и полупротивоточных сепараторов одного типоразмера одинаковы и взаимозаменяемы.

2. При мокром магнитном обогащении в одной обогатительной операции одной технологической секции лучше использовать два-четыре сепаратора. Это связано с применением пульподелителя для разделения исходного потока пульпы на несколько сепараторов.

3. Если в стадии обогащения используются перечистные операции, то количество сепараторов перечистой операции должно равняться количеству сепараторов основной сепарации. При этом  $k_3$  сепараторов перечистой операции будет ниже, чем  $k_3$  в основной операции. Например, прямооточные и полупротивоточные барабанные сепараторы ПБМ komponуются в многобарабанные (двух- и более) сепараторы и устанавливаются на одной отметке без использования перекачки пульпы.

4. При использовании магнитных сепараторов в заключительных операциях схемы обогащения их технологической задачей является получение готового концентрата. Поэтому производительность этих сепараторов снижают ниже паспортных, так как это приводит к повышению эффективности разделения.

Однако чрезмерное снижение производительности магнитного сепаратора может привести к резкому снижению как технологических, так и экономических показателей. Например, прямооточные и полупротивоточные барабанные

сепараторы эффективно работают при постоянном уровне пульпы в ванне, поддерживаемом с помощью переливного отверстия. При низкой исходной производительности уровень пульпы в ванне упадёт, что приведёт к снижению технологической эффективности сепаратора. Если в схеме обогащения используются сепараторы с электромагнитной системой (валковые, высокоградиентные), то при низкой исходной производительности возрастет удельный расход электроэнергии на одну тонну руды, что снизит экономические показатели обогатительной фабрики.

В процессе промышленной эксплуатации разных типов магнитных сепараторов для обогащения различных типов руд и продуктов накоплен большой опыт по величине производительности магнитных сепараторов. Поэтому для многих типов магнитных сепараторов производительность сепаратора оценивается исходя из практики их эксплуатации и из рекомендаций заводов-производителей.

*Производительность барабанных сепараторов для сухого обогащения с верхней подачей материала*

Производительность сепаратора определяется длиной барабана, линейной скоростью вращения барабана, крупностью и плотностью исходного продукта. Производительность одного сепаратора ( $Q_{\text{сеп}}$ ) ориентировочно можно рассчитать по формуле, т/ч [63]:

$$Q_{\text{сеп}} = 0,82nLv\rho \frac{d_2 - d_1}{\lg(d_2 / d_1)} ab, \quad (4.3)$$

где  $n$  – число головных (верхних) барабанов;  $L$  – рабочая длина барабана, м;  $v$  – линейная скорость вращения головного барабана, м/с;  $\rho$  – плотность руды, т/м<sup>3</sup>;  $d_1$  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. 4.19 и 4.20.

Формула (4.3) 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  $Q_{\text{сеп}}$ . Например, если технологической задачей обогащения является получение хвостов с заданным значением массовой доли магнитного минерала, то при повышении

индукции магнитного поля сепаратора можно увеличить высоту слоя материала в рабочей зоне разделения или увеличить линейную скорость вращения барабана. Это приведёт к увеличению производительности магнитного сепаратора.

Таблица 4.19  
Значение коэффициента «а» в формуле (5.2) при  $v = 1$  м/с [63]

| Крупность питания, мм | 10–0 | 20–0 | 30–0 | От 40–0;<br>До 60–0 | 10–5 | 20–6 | 30–6 | От 40–6;<br>До 60–6 |
|-----------------------|------|------|------|---------------------|------|------|------|---------------------|
| Значение «а»          | 2,5  | 1,5  | 1,1  | 1,0                 | 1,2  | 0,75 | 0,65 | 0,6                 |

Таблица 4.20  
Значение коэффициента «b» в формуле (5.2) [63]

| Отношение числа барабанов, используемых для пересортировки хвостов, к числу основных барабанов | 0:1 | 1:2  | 1:1 | 2:2 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|-----|-----|
| Значение «b»                                                                                   | 1,0 | 1,25 | 1,5 | 1,5 |

Формула (4.3) кроме барабанных сепараторов справедлива и для других сепараторов с верхней подачей материала для сухого обогащения – валковых сепараторов, шкивных барабанных и валковых сепараторов, электродинамических шкивных и барабанных сепараторов.

На рис. 4.25 приведены зависимости производительности однобарабанного (шкивного, валкового) сепаратора с верхней подачей материала от крупности  $0-d_{\max}$  и плотности исходного питания и от линейной скорости вращения барабана, рассчитанные по формуле (4.3).

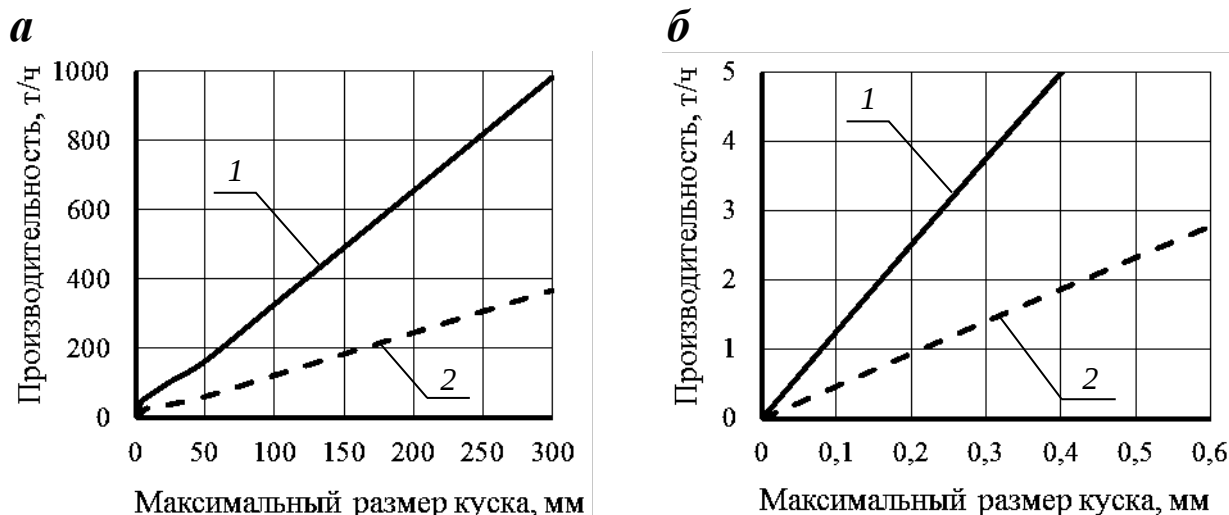


Рис. 4.25. Зависимость производительности барабанного сепаратора с верхней подачей материала от крупности исходного питания:  
а – крупность исходного продукта от 0 до 300 мм; б – крупность исходного продукта от 0 до 0,6 мм:  
1 –  $\rho = 4$  т/м<sup>3</sup>;  $v = 2$  м/с; 2 –  $\rho = 3$  т/м<sup>3</sup>;  $v = 1$  м/с

Коэффициент « $a$ » при размере максимального куска в питании более 40 мм принят равным единице. При размере максимального куска в питании менее 40 мм коэффициент « $a$ » рассчитан по регрессионной модели, полученной по данным табл. 4.19:  $a=3,875-0,1615d_{\max}+0,0023d_{\max}^2$ .

Производительность барабанного (шкивного, валкового) сепаратора с верхней подачей материала может значительно измениться в зависимости от крупности и плотности исходного продукта и от линейной скорости вращения барабана. По зависимости 4.25,  $a$  можно оценивать производительность барабанных и шкивных сепараторов при обогащении магнетитовых руд. По зависимости 4.25,  $b$  можно оценивать производительность валковых сепараторов при обогащении слабомагнитных руд и при обезжелезивании, например, кварцевых концентратов, а также можно оценивать производительность барабанных электрических сепараторов.

*Производительность барабанных сепараторов с нижней подачей материала для мокрого обогащения сильномагнитных руд*

Производительность барабанного сепаратора с нижней подачей материала для мокрого обогащения сильномагнитных руд рассчитывают по величине удельной производительности на один метр длины барабана. Производительность одного сепаратора (по сухому исходному питанию), т/ч:

$$Q_{\text{сеп}} = q L, \quad (4.4)$$

где  $q$  – удельная производительность по твёрдому, т/(м·ч);  $L$  – рабочая длина барабана, м.

Величина  $q$  принимается по данным практики работы сепараторов в зависимости от стадии обогащения (крупности исходных частиц и содержания в питании сильномагнитных минералов) и от типа ванны сепаратора [19, 21, 63, 68].

Ориентировочные значения удельной производительности сепараторов ПБМ приведены в табл. 4.21.

Таблица 4.21

Значение удельных производительностей сепараторов ПБМ

| Тип сепаратора                                                                            |              |               |               |               |                |                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| ПБМ-90/250                                                                                | ПБМ-П-90/250 | ПБМ-П-120/300 | ПБМ-П-150/200 | ПБМ-ПП-90/250 | ПБМ-ПП-120/300 | ПБМ-ПП-150/200 |
| I (II) стадия обогащения, крупность питания от 15 до 40 % кл.-71 мкм ( $d_{\max}=1-3$ мм) |              |               |               |               |                |                |
| 30-50                                                                                     | 30-50        | 50-70         | 60-100        | -             | -              | -              |
| II (III) стадия обогащения, крупность питания от 60 до 80 % кл.-71 мкм                    |              |               |               |               |                |                |
| -                                                                                         | -            | -             | -             | 20-30         | 30-40          | 40-50          |
| III (IV) стадия обогащения, крупность питания от 80 до 100 % кл.-71 мкм                   |              |               |               |               |                |                |
| -                                                                                         | -            | -             | -             | 5-15          | 10-20          | 10-25          |

Если в стадии обогащения используется несколько операций (основная и перечистные), то рассчитывают необходимое количество сепараторов в основной операции. Тип и количество сепараторов в перечистных операциях принимают по типу и количеству сепараторов в основной операции.

*Производительность валковых (барабанных) сепараторов с нижней подачей материала для сухого и мокрого обогащения [13, 63]*

Производительность валковых сепараторов с нижней подачей для сухого обогащения определяется шириной питающего лотка, скоростью подачи питания в рабочую зону разделения, крупностью и плотностью исходного продукта, а также скоростью извлечения (удаления) магнитного продукта. Производительность сепаратора по исходному продукту ориентировочно можно рассчитать по формуле, т/ч:

$$Q_{\text{сеп}} = 3,6Kf\nu_1\rho h_1, \quad (4.5)$$

где  $K$  – ширина потока исходного продукта, м;  $f$  – коэффициент заполнения слоя руды;  $\nu_1$  – скорость подачи питания в рабочую зону, м/с;  $\rho$  – плотность исходного продукта, кг/м<sup>3</sup>;  $h_1$  – средняя высота слоя исходного продукта на питающем лотке или во впадинах нижнего полюса, м.

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

$$f = \pi(d_2 - d_1) / (6d_2 \ln(d_2/d_1)). \quad (4.6)$$

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 (4.5) 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:

$$Q_m = 3,6Lf\nu\rho_m h_m, \quad (4.7)$$

где  $L$  – рабочая длина вала или барабана, м;  $f$  – коэффициент заполнения слоя извлечённых слабомагнитных частиц;  $\nu$  – линейная скорость вращения вала или барабана, м/с;  $\rho_m$  – плотность слабомагнитных частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $h_m$  – средняя высота слоя слабомагнитных частиц на поверхности вала или барабана, м.

Для полного извлечения из исходного продукта слабомагнитных частиц необходимо выполнение следующего условия:

$$Q_{\text{сеп}} \leq Q_{\text{м}}/\alpha_{\text{м}}, \quad (4.8)$$

где  $\alpha_{\text{м}}$  – массовая доля слабомагнитных частиц в исходном продукте, д.ед.

Производительность валковых (барабанных) сепараторов с нижней подачей материала для мокрого обогащения 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:

$$Q_{\text{сеп}} = 3,6K\nu_1 h \rho_{\text{п}} \beta_{\text{т}}, \quad (4.9)$$

где  $K$  – ширина ванны (ширина потока исходного продукта), м;  $\nu_1$  – скорость пульпы в зоне разделения (скорость подачи питания в рабочую зону), м/с;  $h$  – глубина ванны (высота рабочей зоны разделения), м;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность пульпы, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta_{\text{т}}$  – содержание твёрдого в пульпе, д. ед.

Плотность пульпы связана с содержанием твёрдого в ней и с плотностью исходного продукта  $\rho$  зависимостью, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_{\text{п}} = 1000 \cdot \rho / (1000 \cdot \beta_{\text{т}} + \rho(1 - \beta_{\text{т}})). \quad (4.10)$$

Подставив в равенство (4.10) вместо  $\rho_{\text{п}}$  её значение, получим:

$$Q = 3600K\nu_1 h \beta_{\text{т}} \cdot \rho / (1000 \cdot \beta_{\text{т}} + \rho(1 - \beta_{\text{т}})). \quad (4.11)$$

Скорость перемещения пульпы через сепаратор прямо пропорционально влияет на производительность. Допустимая скорость  $\nu_1$  выбирается таким образом, чтобы обеспечить полное извлечение слабомагнитных частиц из потока пульпы. Скорость  $\nu_1$  зависит от силы магнитного поля сепаратора, магнитной восприимчивости частиц, длины и высоты зоны разделения. Увеличение плотности пульпы (содержания твёрдого в ней) позволяет несколько повысить производительность сепаратора, однако это может привести к ухудшению качества концентрата.

*Расчёт производительности валковых сепараторов с нижней подачей материала для сухого и мокрого обогащения по удельной нагрузке*

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

$$Q_{\text{сеп}} = nqL, \quad (4.12)$$

где  $n$  – количество верхних валков;  $q$  – удельная производительность, т/(ч·м);  $L$  – рабочая длина одного валка, м.

Удельную производительность валковых сепараторов во многом определяют крупность частиц питания, массовая доля слабомагнитной фракции в питании и плотность частиц питания. Некоторые значения удельной производительности приведены в табл. 4.22.

Таблица 4.22

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<br>Мокрый   | -0,5+0<br>-2+0        | 3<br>3,5-5,0                         |
| Кварцевое и полевошпатовое сырьё, абразивы и др. | Сухой             | -2(1)+0<br>-0,16+0    | 1,5-2,5<br>1,0                       |
| Черновые концентраты россыпных месторождений     | Сухой             | -1+0                  | 1,0                                  |

*Производительность высокоградиентных сепараторов, других типов сепараторов и вспомогательного оборудования*

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

Производительность одного сепаратора принимают по данным практики работы и по данным завода-изготовителя. Максимальная производительность некоторых типов сепараторов приведена в табл. 4.8-4.10.

Производительность других типов сепараторов и вспомогательного оборудования также принимают по данным практики работы и по данным завода-изготовителя. Размагничивающие аппараты выбирают по диаметру трубы для перекачки пульпы.

## 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. Магнитная сила 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 (магнетитовой или титаномagnetитовой) крупностью  $-25+0$  мм получают классы  $-25+10$  мм и  $-10+0$  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 применяют и более простые схемы без предварительного 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 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 применяют магнитные дешламаторы. 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 флокул применяется перед операциями классификации, тонкого грохочения 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 попадут в пески и далее – в мельницу, что приведёт к увеличению циркулирующей нагрузки и переизмельчению продукта. Наличие флокул в готовом концентрате, поступающем на фильтрование, приводит к увеличению влажности кека, так как вода, занимающая пространство между частицами, образующими флоккулы, выводится в фильтрат не полностью.

В схемах регенерации тяжелосредних суспензий размагничивание применяется после магнитной сепарации для разрушения флокул. Наличие флокул 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.

*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 3-4 %, то при обогащении руды крупностью  $-2+0$  мм допустимая влажность снижается до 0,5-1 %.

*Магнетизирующий обжиг.* Обжиг-магнитное обогащение состоит из магнетизирующего обжига руды и последующей магнитной сепарации в слабом магнитном поле. 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 ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ).

## **5.2. Обогащение магнетитовых и титаномагнетитовых руд**

### **5.2.1. Классификация и характеристики железных руд**

По вещественному составу железные руды можно разделить на железистые кварциты, скарные магнетитовые руды, титаномагнетитовые руды, бурожелезняковые руды и сидеритовые руды.

Доля добычи и переработки сидеритовых руд в России весьма незначительна. Их перерабатывают на Бакальском рудоуправлении (Челябинская обл.). Основным рудным минералом является сидерит ( $\text{FeCO}_3$ ).

Бурожелезняковые руды, так же как и сидеритовые руды, в России практически не перерабатываются. Основными рудными минералами являются гё-

тит и гидрогётит. Для получения концентратов с массовой долей железа более 60 % необходим магнетизирующий обжиг. Применение такой технологии значительно увеличивает затраты на обогащение, поэтому бурые железняки в настоящее время не востребованы.

Основными промышленными типами железных руд в России являются три типа руд – железистые кварциты, скарновые магнетитовые руды, титано-магнетитовые руды (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Характеристики запасов основных промышленных типов  
железных руд России [16, 38, 68]

| Промышленный тип руды       | Генетический тип месторождения                | Массовая доля железа, % | Доля в запасах, % | Соотношение по добыче, % |
|-----------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------|
| Железистые кварциты         | Осадочно-метаморфический                      | 29-35                   | 66,7              | 66                       |
| Скарновые магнетитовые руды | Контактово- и гидротермально-метасоматический | 20-35                   | 15,8              | 16                       |
| Титаномагнетитовые руды     | Магматический                                 | 15-20                   | 13,7              | 17                       |
| Прочие руды                 | -                                             | -                       | 3,8               | 1                        |

### Железистые кварциты

Особенностью железистых кварцитов является повышенное содержание в них кремнезёма ( $\text{SiO}_2$  более 35 %). Кварц в этих рудах является основным породообразующим минералом.

Критерием деления железистых кварцитов на типы служит отношение массовых долей железа магнетитового ( $\text{Fe}_{\text{магн}}$ ) и железа общего ( $\text{Fe}$ ). При этом промышленную ценность руды определяет массовая доля в ней железа магнетитового. В настоящее время обогащают железистые кварциты с  $\text{Fe}_{\text{магн}}$  более 18-20 % при отношении  $\text{Fe}_{\text{магн}}/\text{Fe}$  не менее 0,5.

По минеральному составу природные типы кварцитов подразделяют на разновидности. Магнетитовые кварциты подразделяют на следующие основные разновидности: магнетитовая, силикат-магнетитовая, силикат-гематит-магнетитовая и др. Гематитовые кварциты подразделяют на следующие основные разновидности: магнетит-гематитовая, силикат-магнетит-гематитовая и др. Первое слово в характеристике разновидности руды характеризует магнитные и слабомагнитные минералы, содержащиеся в руде в меньшем количестве.

Для железистых кварцитов характерна полосчатая текстура с чередованием полос рудных и нерудных минералов.

По размеру рудной вкрапленности (размер зёрен магнетита и гематита) выделяют шесть групп структур [68]:

- дисперсная вкрапленность – менее 0,03 мм;
- весьма тонкая вкрапленность – 0,03-0,07 мм;
- тонкая вкрапленность – 0,07-0,2 мм;
- мелкая вкрапленность – 0,2-1 мм;
- средняя вкрапленность – 1-3 мм;
- крупная вкрапленность – более 3 мм.

В связи с преобладанием тонкой и весьма тонкой вкрапленности магнетита в железистых кварцитах основных российских месторождений в схемах обогащения в основном используется трёхстадиальное измельчение до крупности 90-100 % класса -0,071 мм.

Основные минералы железистых кварцитов приведены в табл. 5.2. Минеральный состав железистых кварцитов предопределяет качество получаемых железных концентратов.

Таблица 5.2

Основные минералы промышленных типов железных руд

| Рудные минералы             |                                                                                                | Породные минералы                                        |                                                                                 |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| основные                    | второстепенные                                                                                 | основные                                                 | второстепенные                                                                  |
| Железистые кварциты         |                                                                                                |                                                          |                                                                                 |
| Магнетит, гематит           | Гидроокислы железа, мартит, ильменит, пирит, пирротин, халькопирит                             | Кварц, амфиболы, слюды, хлорит                           | Апатит, карбонаты, полевые шпаты, пироксен, роговая обманка, гранат             |
| Скарновые магнетитовые руды |                                                                                                |                                                          |                                                                                 |
| Магнетит                    | Гематит, гидроокислы железа, мартит, ильменит, пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит | Пироксен, амфиболы, хлорит, плагиоклаз, карбонаты        | Кварц, эпидот, гранат, апатит                                                   |
| Титаномагнетитовые руды     |                                                                                                |                                                          |                                                                                 |
| Титаномагнетит              | Магнетит, ильменит, пирит, пирротин                                                            | Пироксен, амфиболы, плагиоклаз, роговая обманка, диаллаг | Оливин, серпентин, шпинель, перидотит, хлорит, эпидот, карбонаты, кварц, апатит |

Основными нерудными минералами являются кварц и силикатсодержащие минералы (амфиболы – куммингтонит, грюнерит и др., хлорит, слюды). Это предопределяет повышенную массовую долю SiO<sub>2</sub> не только в руде, но и в готовых концентратах (до 8-10 %). Это снижает цену железного концентрата, так как требует добавления в концентрат флюса (извести) при его окусковании.

Магнетит и гематит, содержащиеся в железистых кварцитах, весьма «чистые», практически без примесей. Массовая доля железа в магнетите (более 72 %) и в гематите (более 69,8 %) большинства месторождений практически соответствует стехиометрическому составу.

Основным извлекаемым минералом в железный концентрат является магнетит. Природная «чистота» магнетита позволяет получать концентраты с высокой массовой долей железа (более 65 %).

Гематит, представленный дисперсной и весьма тонкой вкрапленностью, в концентрат не извлекают, так как это не позволяет использовать высокопроизводительные гравитационные аппараты. Магнитное обогащение с использованием сепараторов с высоким магнитным полем также не позволяет получать гематитовый концентрат в связи с наличием магнитных свойств у ряда породных минералов (амфиболы, хлорит, биотит). На Михайловском и Кимкано-Сутарском ГОКах гематит не извлекается и выводится в хвосты. В России только Оленегорский ГОК получает гематитовый концентрат с помощью отсадочных машин из гематит-магнетитовой руды Оленегорского месторождения. При этом в концентрат извлекаются только наиболее крупные зёрна гематита. Гематит крупностью менее 0,2-0,3 мм в основном не извлекается и уходит в хвосты фабрики.

В железистых кварцитах присутствуют минералы, содержащие вредные примеси S (пирротин, пирит, халькопирит) и P (апатит). В основном эти минералы выводятся в хвосты обогащения (кроме сильномагнитного пирротина) и не снижают качества железного концентрата.

В России железистые кварциты перерабатываются на следующих предприятиях: Лебединский, Стойленский, Михайловский, Оленегорский, Костомукшский ГОКи и комбинат «КМАруда». В 2017 г. введён в эксплуатацию Кимкано-Сутарский ГОК.

### **Скарновые магнетитовые руды**

Особенностью скарновых магнетитовых руд является пониженное содержание в них кремнезёма ( $\text{SiO}_2$  менее 30 %) и повышенное содержание основных окислов ( $\text{CaO} + \text{MgO}$  более 10 %).

Скарновые магнетитовые руды, как правило, представлены одним природным типом руды – магнетитовой рудой. Поэтому их часто так и называют: «магнетитовые руды».

Для разных месторождений выделяют различные разновидности в зависимости от особенностей минерального состава, физических свойств, размера

вкрапленности магнетита, чистоты магнетита и др. [15, 17]. Руды в основном подразделяют на технологические разновидности, например, на богатые, среднего качества и забалансовые (убогие) руды или, например, малофосфористые и фосфористые руды.

Часто скарновые магнетитовые руды бывают комплексные, например бадделеит-апатит-магнетитовая руда Ковдорского месторождения, медно-магнетитовая руда Высокогорского месторождения.

Скарновые магнетитовые руды характеризуются сплошными массивными и полосчатыми, пятнистыми и вкрапленными текстурами.

Классификация магнетитовых руд по размеру рудной вкрапленности (размер зёрен магнетита) аналогична классификации для железистых кварцитов, приведённой в работе [68], что вполне естественно, так как эти руды относятся к железным рудам. Иногда используют несколько другую классификацию, например в работе [17], так как в целом размер зёрен магнетита в скарновых рудах выше, чем в железистых кварцитах. Как правило, размер зёрен магнетита в скарновых магнетитовых рудах выше 0,071 мм, что позволяет охарактеризовать вкрапленность в основном как тонкую и мелкую. Отдельные зёрна магнетита достигают размера более 3 мм.

Основные минералы скарновых магнетитовых руд приведены в табл. 5.2.

Массовая доля  $\text{SiO}_2$  в основных нерудных минералах невысокая, что предопределяет низкую массовую долю в готовых концентратах (менее 4 %). Это повышает металлургическую ценность концентратов, полученных из скарновых магнетитовых руд.

Магнетит, содержащийся в магнетитовых рудах, может быть весьма чистым, практически без примесей и соответствовать стехиометрическому составу (более 72 % Fe). Но на ряде месторождений магнетит может содержать изоморфные примеси, снижающие массовую долю железа в магнетите, что не позволяет получать концентраты с массовой долей железа более 65 %.

В скарновых магнетитовых рудах присутствуют минералы, содержащие вредные примеси S (пирротин, пирит, халькопирит), Zn (сфалерит), Pb (галенит) и P (апатит). В основном эти минералы выводятся в хвосты обогащения (кроме сильномагнитного пирротина) и не снижают качества железного концентрата.

В целом магнетитовые концентраты, получаемые из скарновых руд, несмотря на относительно низкую массовую долю железа (60-65 %), являются востребованными благодаря низкой массовой доле кремнезёма в них. Большой

размер зёрен магнетита в скарновых рудах по сравнению с железистыми кварцитами, позволяет обогащать скарновые магнетитовые руды с использованием двух стадий измельчения до крупности 60-80 % класса -0,071 мм, что снижает затраты на обогащение руды. Использование трёх стадий измельчения до крупности 90 % и более класса -0,071 мм позволит повысить массовую долю железа в концентрате до 65 % и более.

В России скарновые магнетитовые руды перерабатываются на следующих предприятиях: Высокогорский, Ковдорский, Коршуновский ГОКи, ДОФ-5 «ММК», Богословское РУ, Краснокаменский, Таштагольский, Казский, Шерешевский, Гурьевский, Абаканский и Тейский рудники, Абагурская АОФ и Мундыбашская ОФ.

### **Титаномагнетитовые руды**

Особенностью титаномагнетитовых руд является пониженное содержание в них кремнезёма ( $\text{SiO}_2$  менее 35 %) и повышенное содержание основных окислов ( $\text{CaO} + \text{MgO}$  более 25 %), повышенные содержания  $\text{TiO}_2$  (более 1 %) и  $\text{V}_2\text{O}_5$  (более 0,1-0,12 %). Основным рудным минералом является титаномагнетит. По массовой доле железа (15-20 %) титаномагнетитовые руды относятся к бедным рудам.

Титаномагнетитовые руды, как правило, представлены одним природным типом руды – титаномагнетитовая руда.

Титаномагнетит также содержится в ильменитовых, титаномагнетит-ильменитовых и ильменит-титаномагнетитовых рудах. Ильменит в этих рудах имеет промышленное значение, поэтому эти руды относятся к титансодержащим, а не к железным.

Титаномагнетитовые руды могут быть комплексными, например, медно-апатит-титаномагнетитовая руда Волковского месторождения.

Для титаномагнетитовых руд различных месторождений выделяют разновидности в зависимости от особенностей минерального состава, размера вкрапленности магнетита. В основном руды подразделяют на малотитанистые и нормальнотитанистые. Малотитанистые руды имеют более высокую обогатимость. Руды также делятся на технологические разновидности, например, на богатые (более 20 % Fe), средние (16-20 % Fe), бедные (14-16 % Fe) и некондиционные (менее 14 % Fe).

Размер зёрен титаномагнетита изменяется от 0,03 до 1 мм, с преобладанием зёрен 0,07-0,2 мм, что позволяет охарактеризовать основную вкрапленность как тонкую.

Основные минералы титаномагнетитовых руд приведены в табл. 5.2.

Массовая доля  $\text{SiO}_2$  в основных нерудных минералах невысокая, что предопределяет низкую массовую долю в готовых концентратах (4-5 %). Это повышает металлургическую ценность концентратов, полученных из титаномагнетитовых руд.

Титаномагнетит, содержащийся в титаномагнетитовых рудах, включает значительное количество изоморфных примесей (в основном  $\text{Ti}$  и  $\text{V}$ ). Поэтому массовая доля железа в титаномагнетите может изменяться от 65 до 69 % в зависимости от количества примесей. Ванадий является полезной примесью, он извлекается при последующем металлургическом переделе.

В составе титаномагнетитовых руд могут содержаться минералы, включающие вредные примеси ( $\text{S}$  и  $\text{P}$ ). В основном эти минералы выводятся в хвосты обогащения и не снижают качества железного концентрата.

К вредной примеси, содержащейся в титаномагнетите, следует отнести титан. Титан является тугоплавким элементом и нарушает процесс вывода шлака из домен. В настоящее время в России осуществляют металлургическую переработку железных концентратов с массовой долей  $\text{TiO}_2$  не более 3 %.

В целом титаномагнетитовые концентраты, несмотря на относительно низкую массовую долю железа (60-63 %), являются востребованными благодаря низкой массовой доле кремнезёма в них и наличию ванадия.

В связи с преобладанием тонкой вкрапленности титаномагнетита в схемах обогащения используется трёхстадиальное измельчение до крупности 92 % класса -0,071 мм.

В России титаномагнетитовые руды перерабатываются на Качканарском ГОКе и на Красноуральской ОФ.

### **5.2.2. Требования к железным концентратам и железорудному сырью**

Железорудное сырьё и железные концентраты применяют в металлургических процессах для производства чугуна и стали.

В настоящее время основным источником получения стали являются железные концентраты. Железные концентраты получают путём глубокого обогащения железных руд по схемам с применением измельчения и мокрого магнитного обогащения. Крупность железных концентратов составляет менее 1 мм (до 100 % кл. -45 мкм).

В настоящее время в связи с отработкой богатых железных руд резко снизилась доля использования железорудного сырья при производстве стали. К железорудному сырью относятся доменная руда и агломерационная руда (агло-руда). Доменную руду получают путём дробления богатой руды до крупности 70-100 мм и грохочения с целью удаления фракции  $-10(15)+0$  мм, которая используется в качестве аглоруды. Доменная руда крупностью 10-70(100) мм подаётся без подготовки в домну. В настоящее время доменную руду практически не получают.

Аглоруду получают с помощью сухой магнитной сепарации из мелко-дроблённой железной руды крупностью  $-15(25)+0$  мм (см. рис. 4.4, б и в). Агло-руду с требуемой массовой долей железа можно получать далеко не из всех руд. Поэтому аглоруда является востребованным продуктом. Добавление аглоруды в шихту из мелкого железного концентрата позволяет получить более прочный агломерат при меньшем количестве «возврата» (мелочи).

Производство стали из железных концентратов в основном осуществляется по схеме «домна-конвертер», приведённой на рис. 5.1. Тонкоизмельчённый железный концентрат перед подачей в домну подвергают окускованию – агломерации (производство кускового агломерата) или окомкованию (производство окатышей).



Рис. 5.1. Получение стали по схеме «домна-конвертер»

Другим способом получения стали является использование процессов металлизации концентрата или окатышей (прямое восстановление железа) с последующей плавкой металлизированного продукта в электропечах. Этот процесс часто называют внедоменным процессом получения чугуна и стали.

Для осуществления основных промышленных процессов прямого восстановления железа, например, для процесса металлизации «Midrex», необходимы высококачественные концентраты (суперконцентраты) с массовой долей железа более 69 % с минимальной массовой долей вредных примесей. Получение высококачественных железных концентратов связано с определёнными трудностями, в основном технико-экономического характера. Поэтому доля стали, получаемой из железорудного сырья с использованием процессов металлизации, незначительна и основным процессом получения стали остаётся доменный процесс. В России высококачественные концентраты для процесса металлизации «Midrex» получают на Лебединском и Михайловском ГОКах.

Металлургическая ценность железных руд и концентратов определяется массовой долей в них основного элемента (Fe), полезных (Mn, Ni, Cr, V), шлакообразующих (Si, Ca, Mg, Al) и вредных (S, P, As, Zn, Pb, Cu, K, Na) примесей. В табл. 5.3 приведены основные характеристики железных концентратов ГОКов России.

Шлакообразующие примеси разделяются на основные (CaO, MgO) и кислые (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Предпочтительно более высокое отношение основных окислов к кислым. Поэтому SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> можно отнести к вредным примесям.

Повышенная массовая доля в концентрате SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> предполагает добавление в шихту для производства агломерата и окатышей известняка, что значительно повышает себестоимость производства и, как следствие, снижает цену железного концентрата.

Для ГОКов, перерабатывающих железистые кварциты, массовая доля SiO<sub>2</sub> в концентрате является вторым показателем (наряду с массовой долей железа), определяющим качество концентрата. Для ГОКов, перерабатывающих скарновые магнетитовые руды и титаномagnetитовые руды, массовая доля SiO<sub>2</sub> в концентрате, как правило, не является показателем качества, так как в исходной руде диоксид кремния содержится в меньших количествах и удаляется в хвосты при обогащении.

Вредные примеси или ухудшают свойства металла, или усложняют процесс выплавки чугуна (разрушают элементы доменной печи). В табл. 5.4 приве-

дены требования к железным концентратам по массовой доле в них вредных примесей и вид их негативного влияния на доменный процесс.

Таблица 5.3

Основные характеристики железорудных концентратов ГОКов России

| Концентрат, сырьё                                                                | Массовая доля, % |                  | Влажность, %   | Крупность, мм                |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|----------------|------------------------------|
|                                                                                  | Fe               | SiO <sub>2</sub> |                |                              |
| Железорудное сырьё                                                               |                  |                  |                |                              |
| Доменная сортированная руда                                                      | Не менее 40      | Не более 30      | Не более 4     | 10-70 (до 100)               |
| Аглокуда                                                                         | Не менее 45      | Не более 30      | Не более 5     | 0-10 (до 18 % класса +10 мм) |
| Концентраты для доменного процесса                                               |                  |                  |                |                              |
| Концентраты из железистых кварцитов                                              | 65-68            | 5-10             | Не более 10-11 | До 100 % класса -0,045 мм    |
| Концентраты из скарновых руд                                                     | 60-65            | 3-4              | Не более 10-11 | До 100 % класса -0,071 мм    |
| Концентраты из титаномагнетитовых руд                                            | 60-63            | 4-5              | Не более 10-11 | До 95 % класса -0,071 мм     |
| Высококачественные концентраты для процесса «металлизации»                       |                  |                  |                |                              |
| Концентрат из железистых кварцитов (Лебединский ГОК) [81]                        | Не менее 69,5    | Не более 3,5     | Не более 10,2  | 96,2-97,42 класса -0,045 мм  |
| Концентрат из скарновой руды (Высокогорский ГОК, лабораторные испытания)         | 70,3             | 0,8              | -              | 100 % класса -0,071 мм       |
| Концентрат из титаномагнетитовой руды (Качканарский ГОК, лабораторные испытания) | 67,1             | 0,96             | -              | 100 % класса -0,071 мм       |

Таблица 5.4

Требования к железным концентратам по вредным примесям

| Вредная примесь                    | Допустимая массовая доля, %              | Вид негативного влияния на доменный процесс                                 |
|------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| P                                  | 0,01-0,15                                | Хладноломкость чугуна                                                       |
| S                                  | 0,15 (до 0,6)                            | Красноломкость чугуна                                                       |
| Cu                                 | 0,2                                      | Красноломкость и снижение свариваемости чугуна                              |
| As                                 | 0,05-0,1                                 | Снижение свариваемости чугуна                                               |
| Zn                                 | 0,1-0,2                                  | Разрушение огнеупорной кладки доменной печи                                 |
| Pb                                 | 0,01-0,015                               | Разрушение лещади доменной печи                                             |
| Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O | 0,5                                      | Образование настывей в газоходах и верхней части доменной печи              |
| Ti                                 | В зависимости от типа доменного процесса | Снижение жидкоподвижности шлака (затруднение вывода шлака из доменной печи) |

Титан, содержащийся в железном концентрате, часто относят к полезным примесям, легирующим сталь. Однако об этом можно говорить весьма условно, так как титан является тугоплавким элементом и выводится в шлак при домен-

ном процессе и его повышенная массовая доля в концентрате приводит к нарушению процесса вывода шлака из домны. Поэтому магнетитовые концентраты с массовой долей  $\text{TiO}_2 < 0,5 \%$  и титаномagnetитовые концентраты с массовой долей  $\text{TiO}_2 > 1-3 \%$  (до 6 %) перерабатываются на разных металлургических заводах с различными доменными процессами. Это позволяет отнести титан к вредным примесям железного концентрата, так как он нарушает доменный процесс и основная его часть выводится в отходы в виде шлака.

Требования к высококачественному железному концентрату для процесса «металлизации» по вредным примесям выше требований, приведённых в табл. 5.4. Например, в высококачественном концентрате Лебединского ГОКа массовая доля S, P,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  равна, соответственно 0,04-0,16; 0,01-0,012; 0,2-0,25; 0,045-0,13 % [81].

### 5.2.3. Схемы обогащения магнетитовых и титаномagnetитовых руд

Схемы обогащения магнетитовых и титаномagnetитовых руд основных промышленных типов построены по принципу стадийного измельчения и магнитной сепарации с выделением хвостов после каждой операции изменения крупности продукта. Готовый концентрат получается после последней стадии измельчения и магнитной сепарации. Схемы обогащения достаточно экономичны и эффективны, так как в них реализован принцип «не измельчать ничего лишнего» – после каждой стадии измельчения выводятся отвальные хвосты [24, 40, 55].

На многих фабриках применяется сухая магнитная сепарация мелкодроблённой 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 (аглоруду). В настоящее время на ОФ внедряются новые сепараторы ПБС с  $B = 0,25-0,3$  Тл для снижения массовой доли железа в хвостах СМС.

На некоторых ГОКах используется сухая магнитная сепарация крупнодроблённой руды крупностью 0-300 (350) мм, например, на обогатительной фабрике Кимкано-Сутарского ГОКа. На Костомукшском ГОКе сухая магнитная сепарация крупнодроблённой руды используется в карьере для предварительного обогащения бедных руд.

Измельчение магнетитовых руд осуществляется, как правило, в три или в две стадии. В первой стадии измельчения применяют стержневые мельницы

или шаровые мельницы, работающие в замкнутом цикле со спиральными классификаторами. Во второй и третьей стадиях используют шаровые мельницы, работающие в замкнутом цикле с гидроциклонами. На Лебединском ГОКе применяется технология самоизмельчения.

Магнитная сепарация осуществляется в 2-5 стадий. Под стадией магнитной сепарации в схемах обогащения магнетитовых руд понимается не только обогащение готовых продуктов цикла измельчения, но и сепарация внутренних промпродуктов цикла измельчения или отдельная сепарация промпродуктов, разделённых по крупности. В каждой стадии может использоваться от 1 до 3 последовательных операций мокрой магнитной сепарации (ММС), с выделением в каждой операции отвальных хвостов. Большее число операций ММС характерно при обогащении магнетитовых кварцитов с целью более полного вывода в хвосты немагнитных шламов.

Основными обогатительными аппаратами на ОФ являются сепараторы ПБМ с прямоточными, противоточными и полупротивоточными ваннами с индукцией магнитного поля  $B=0,16$  Тл (до 0,3 Тл).

На рис. 5.2 приведена схема обогащения титаномагнетитовой руды (Качканарский ГОК) с тремя стадиями измельчения (со стержневым измельчением в первой стадии) и с четырьмя стадиями ММС. В четвёртой стадии ММС использованы две последовательные операции (два приёма сепарации).

Во II стадии измельчения в замкнутом цикле на многих ОФ применяется магнитная сепарация на сливе шаровых мельниц (см. рис. 5.2), что позволяет не только снизить циркулирующую нагрузку, но и частично уменьшить переизмельчение вмещающих пород за счёт их вывода в немагнитный продукт перед операцией разделения по крупности в гидроциклонах. Причём при обогащении магнетитовых руд переизмельчение вмещающих пород более вредно, чем переизмельчение магнетита. Переизмельчение магнетита не приводит к значительному снижению его извлечения в магнитный продукт вследствие магнитной флокуляции, которая приводит к «укрупнению» частиц. Однако при магнитной флокуляции во флокулы попадают тонкие немагнитные частицы, что значительно снижает качество концентрата. При этом чем больше переизмельчён магнетит, тем выше его коэрцитивная сила и тем более устойчива магнитная флокула. Полностью разрушить флокулы или удалить из них тонкие породные частицы достаточно сложно. В результате этого часть тонких породных частиц попадает в концентрат. При этом при обогащении железистых кварцитов в тонкоизмельчённых промпродуктах и концентратах магнетит концентрируется в

классах 20-50 мкм. В более тонких классах увеличивается количество породных частиц, в более крупных классах увеличивается количество сростков, что приводит к снижению качества концентрата [55].

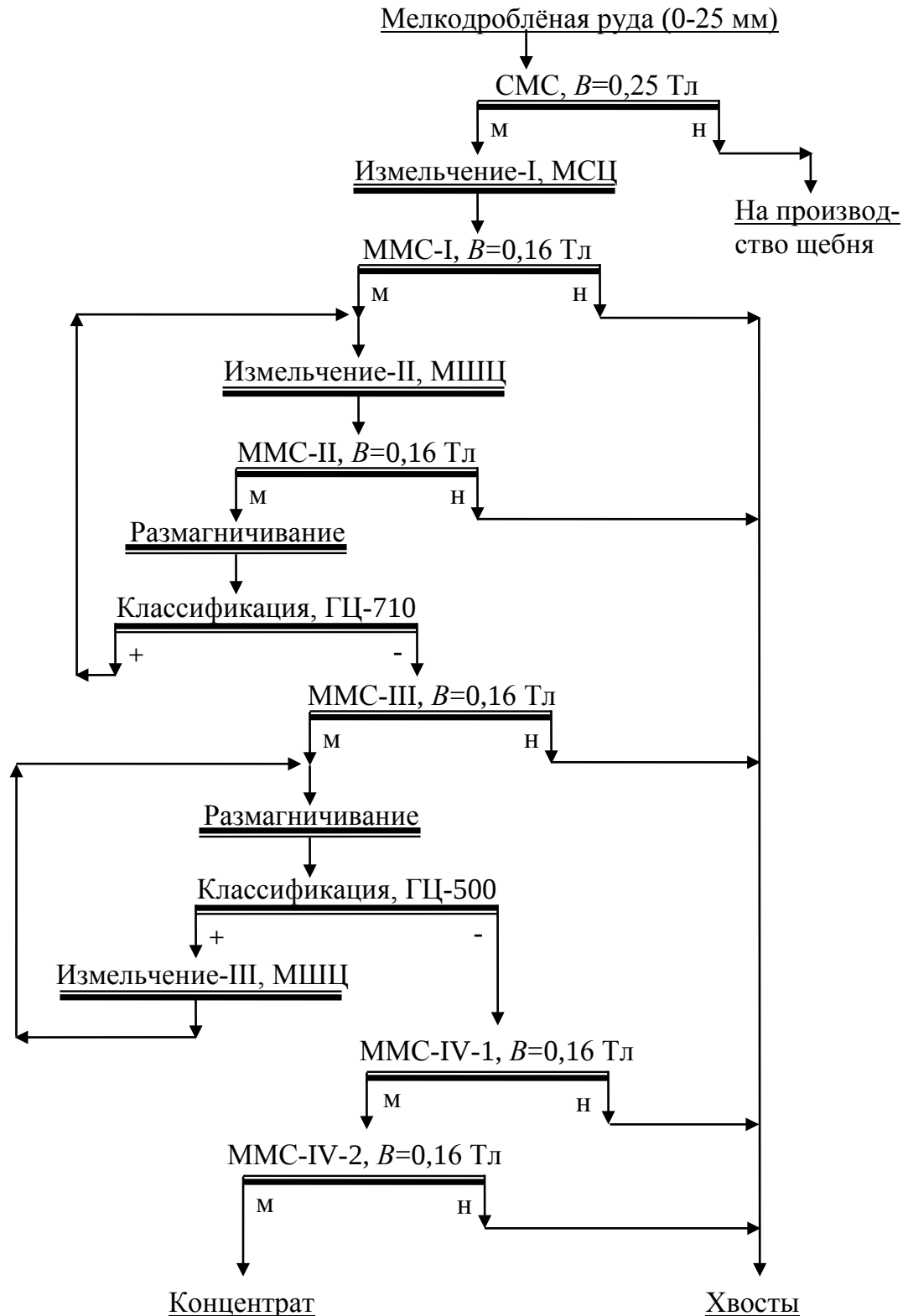


Рис. 5.2. Схема обогащения титаномагнетитовой руды (Качканарский ГОК)

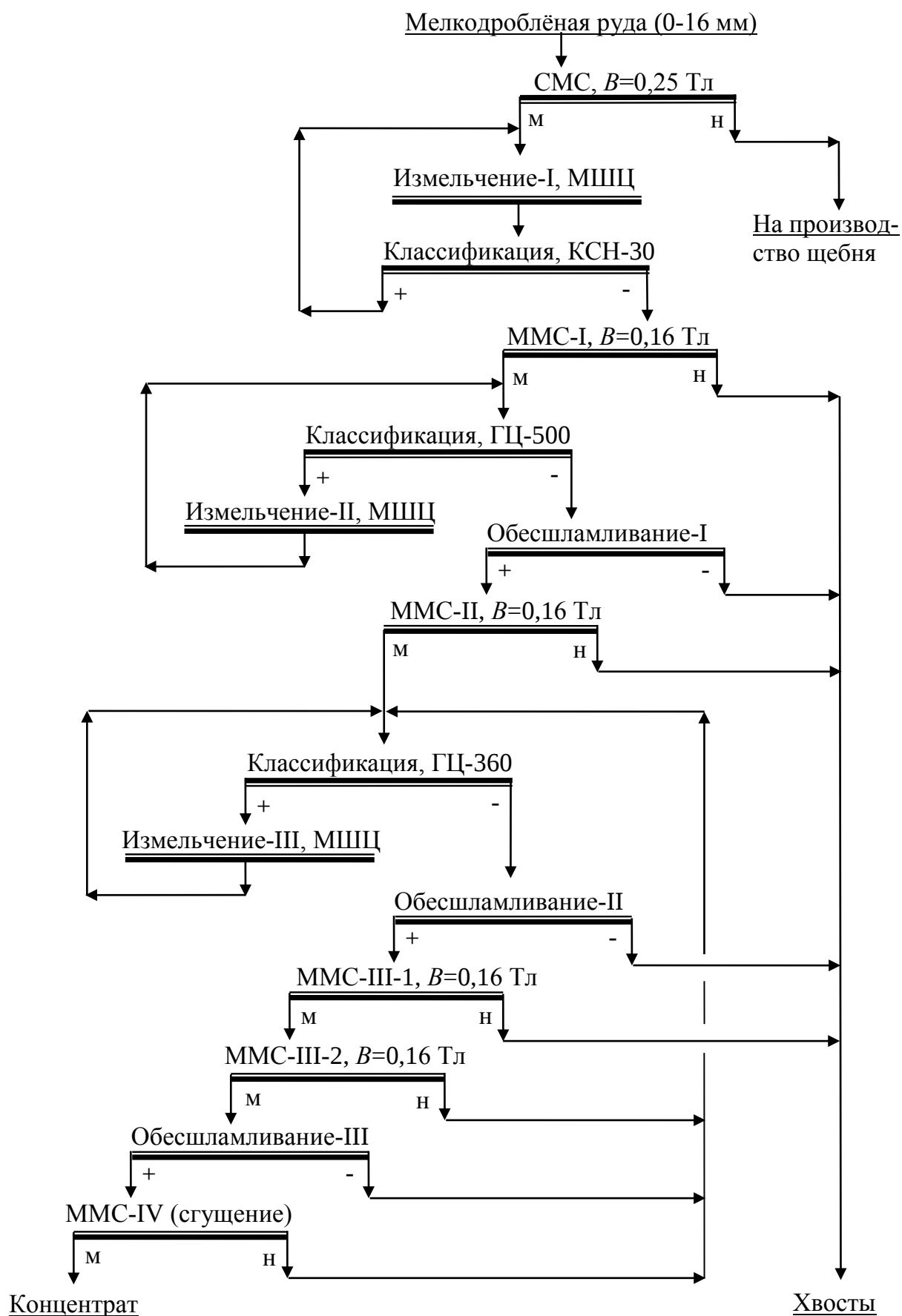


Рис. 5.3. Схема обогащения железистых кварцитов (Михайловский ГОК)

Явление магнитной флокуляции отрицательно сказывается на процесс разделения по крупности (классификация и тонкое грохочение) и на процесс фильтрования. Для дефлокуляции пульп на фабриках, в основном перерабатывающих скарные магнетитовые и титаномagnetитовые руды, применяют размагничивающие аппараты (см. рис. 5.2). Размагничивание, применяемое между последовательными операциями ММС одной стадии, способствует более эффективному удалению в хвосты породных частиц.

На многих обогатительных фабриках операция ММС в сепараторах ПБМ-ПП используется для сгущения готового концентрата перед его фильтрованием.

На фабриках, перерабатывающих железистые кварциты, для удаления шламов используется операция обесшламливания, которой подвергаются сливы гидроциклонов и готовые концентраты. Обесшламливание осуществляется в магнитных дешламаторах МД-5; -9; -12 или в других аппаратах.

На рис. 5.3 приведена принципиальная схема обогащения железистых кварцитов (Михайловский ГОК) с тремя стадиями измельчения (с шаровым измельчением в первой стадии), с тремя стадиями ММС и с тремя операциями обесшламливания. В третьей стадии ММС использованы две последовательные операции (два приёма сепарации). Дополнительная операция ММС-IV используется для сгущения концентрата (сгущающая ММС).

#### **5.2.4. Использование тонкого грохочения в схемах обогащения железных руд**

При измельчении и обогащении магнетитовых руд всех месторождений наблюдается концентрация железа в более мелких классах крупности, как в готовых концентратах, так и в промпродуктах, что иллюстрируют данные, приведённые в табл. 5.5. Причиной избирательного изменения размеров магнетита и вмещающих пород в процессах измельчения являются различия в их прочности.

Результаты, приведённые в табл. 5.5, показывают, что массовая доля железа в крупных классах крупности ниже, чем в мелких классах крупности. При этом данный вывод относится как к бедным промпродуктам ММС-I и ММС-II, так и к конечному концентрату. Поэтому вторым свойством, которое можно, наряду с магнитной восприимчивостью, использовать при обогащении магнетитовых руд, является крупность, и её можно рассматривать как признак разделения по железу.

Вышерассмотренные закономерности перераспределения железа по классам крупности при измельчении и обогащении предопределили использование тонкого гидравлического грохочения в схемах обогащения магнетитовых руд.

Таблица 5.5

Результаты фракционирования по крупности магнитных продуктов стадий ММС (титаномагнетитовая руда, Качканарский ГОК)

| Класс крупности, мм                                         | Выход, % | Массовая доля железа, % | Распределение железа, % |
|-------------------------------------------------------------|----------|-------------------------|-------------------------|
| Промпродукт ММС-I (после измельчения в стержневой мельнице) |          |                         |                         |
| +1,25                                                       | 27,0     | 20,61                   | 20,97                   |
| -1,25+0,63                                                  | 26,0     | 21,15                   | 20,72                   |
| -0,63+0,315                                                 | 21,0     | 25,93                   | 20,52                   |
| -0,315+0,16                                                 | 13,0     | 34,08                   | 16,69                   |
| -0,16+0,1                                                   | 6,0      | 43,60                   | 9,86                    |
| -0,1+0,071                                                  | 3,0      | 48,70                   | 5,50                    |
| -0,071+0                                                    | 4,0      | 38,10                   | 5,74                    |
| Итого                                                       | 100      | 26,54                   | 100,00                  |
| Магнитный продукт ММС-II                                    |          |                         |                         |
| +0,56                                                       | 2,4      | 25,7                    | 1,17                    |
| -0,56+0,28                                                  | 11,4     | 36,5                    | 7,88                    |
| -0,28+0,14                                                  | 23,1     | 47,1                    | 20,58                   |
| -0,14+0,071                                                 | 32,6     | 58,2                    | 35,88                   |
| -0,071+0                                                    | 30,5     | 59,8                    | 34,49                   |
| Итого                                                       | 100,0    | 52,9                    | 100,0                   |
| Магнитный продукт ММС-III                                   |          |                         |                         |
| +0,14                                                       | 3,5      | 28,6                    | 1,7                     |
| -0,14+0,071                                                 | 21,1     | 53,1                    | 18,6                    |
| -0,071+0                                                    | 75,4     | 63,5                    | 79,7                    |
| Итого                                                       | 100,0    | 60,1                    | 100,0                   |
| Магнитный продукт ММС-IV (концентрат)                       |          |                         |                         |
| +0,14                                                       | 0,2      | 49,3                    | 0,2                     |
| -0,14+0,071                                                 | 8,0      | 47,0                    | 5,9                     |
| -0,071+0,044                                                | 20,2     | 61,3                    | 19,5                    |
| -0,044+0                                                    | 71,6     | 66,0                    | 74,4                    |
| -0,071+0                                                    | 91,8     | 65,0                    | 93,9                    |
| Итого                                                       | 100,0    | 63,5                    | 100,0                   |

С помощью тонкого грохочения решаются следующие технологические задачи.

1. Повышение эффективности работы замкнутого цикла измельчения путём улучшения как технологических показателей готового продукта цикла, так и путём улучшения экономических показателей (сокращение удельных затрат на измельчение и обогащение 1 т руды).

2. Повышение качества готового концентрата (увеличение массовой доли железа и снижение массовой доли кремнезёма и других вредных примесей).

3. Подготовка продукта для стадийного выделения концентрата или стадийное выделение концентрата.

Качество концентрата при прочих равных условиях повышается при решении всех технологических задач, так как при тонком грохочении происходит избирательное разделение по крупности [57].

На рис. 5.4, *а, б* приведены замкнутые циклы измельчения магнетитовых руд с использованием тонкого грохочения для разделения измельчённого продукта по крупности. Как правило, эти циклы реализуются во второй и третьей стадиях измельчения, питание которых не превышает 1 мм. Размер отверстий сит грохотов составляет 0,1-0,3 мм. В замкнутом цикле обязательно должна быть использована операция ММС на сливе мельницы для вывода в хвосты вскрытых частиц пустой породы и шламов.

Грохот в замкнутом цикле измельчения обеспечивает большую эффективность классификации по сравнению с гидроциклонами. Это достигается за счёт большего извлечения в готовый продукт класса -71 мкм и, что не менее важно, за счёт получения более богатого (по железу) продукта цикла измельчения (табл. 5.6).

Таблица 5.6

Результаты сравнительных испытаний грохота с  $a=0,1$  мм и ГЦ-710 (Качканарский ГОК, вторая стадия измельчения, см. рис. 5.4, *а*)

| Продукт                      | Выход, % | Массовая доля, % |           | Извлечение, % |           | Эффективность классификации, % |
|------------------------------|----------|------------------|-----------|---------------|-----------|--------------------------------|
|                              |          | Fe               | -0,071 мм | -0,071 мм     | +0,071 мм |                                |
| Грохот «Деррик» с $a=0,1$ мм |          |                  |           |               |           |                                |
| Подрешётный                  | 24,56    | 52,71            | 62,17     | 70,18         | 11,88     | 58,31                          |
| Надрешётный                  | 75,44    | 37,41            | 8,60      | 29,82         | 88,12     |                                |
| Исходный                     | 100,00   | 41,16            | 21,76     | 100,00        | 100,00    |                                |
| ГЦ-710                       |          |                  |           |               |           |                                |
| Слив                         | 17,63    | 40,81            | 60,57     | 57,29         | 8,55      | 48,74                          |
| Пески                        | 86,37    | 44,37            | 9,67      | 42,71         | 91,45     |                                |
| Исходный                     | 100,00   | 43,74            | 18,64     | 100,00        | 100,00    |                                |

При использовании грохота в замкнутом цикле измельчения возможно сократить объём измельчительного оборудования (уменьшить количество или объём мельниц) [56] или уменьшить количество стадий измельчения, например с трёх до двух. Возможен вариант увеличения производительности цикла измельчения и технологической секции в целом при неизменном объёме мельниц и при сохранении качества концентрата. Это снижает себестоимость переработки 1 т руды. Кроме этого, применение грохотов в замкнутом цикле измельчения позволяет повысить извлечение железа в концентрат за счёт повышения

средней крупности готового продукта цикла вследствие снижения переизмельчения магнетита.

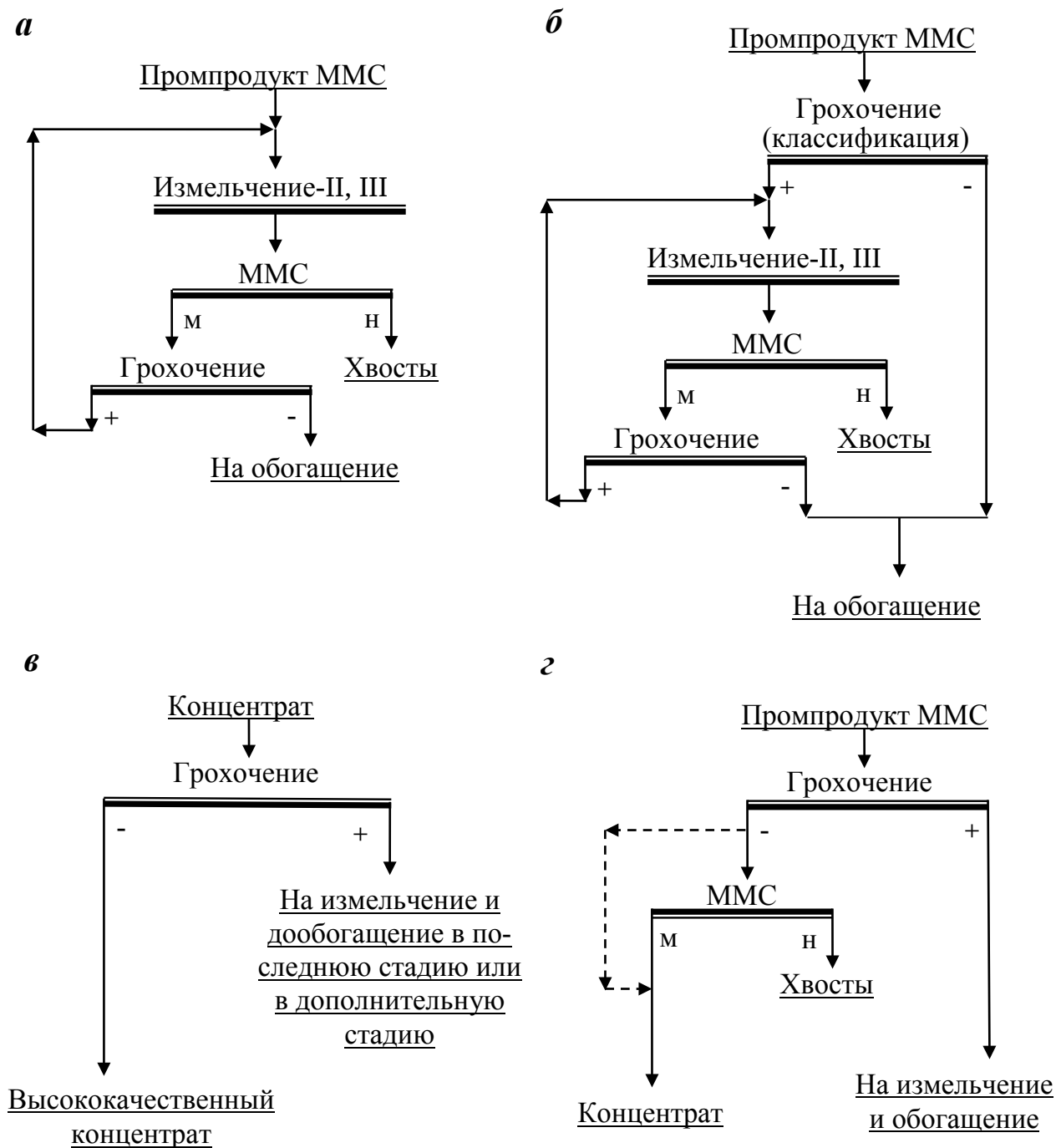


Рис. 5.4. Варианты применения тонкого грохочения в схемах обогащения магнетитовых руд:

*а* – в замкнутом цикле измельчения с поверочным грохочением; *б* – в замкнутом цикле измельчения с предварительным грохочением (классификацией) и с поверочным грохочением; *в* – для повышения качества готового концентрата; *г* – для стадийного выделения концентрата

На рис. 5.4, в приведен элемент схемы с использованием тонкого грохочения для повышения качества готового концентрата. Подрешётный продукт является более качественным концентратом с большей массовой долей железа и меньшей массовой долей вредных примесей. Надрешётный продукт перерабатывается либо в отдельной стадии, либо направляется в последнюю стадию на измельчение и обогащение, являясь циркулирующей нагрузкой. Эффективность использования тонкого грохочения заключается в повышении качества готового концентрата.

На рис. 5.4, г приведены элементы схемы обогащения магнетитовых руд с использованием тонкого грохочения в качестве подготовительной для осуществления стадияльного получения концентрата. При этом если подрешётный продукт без магнитного обогащения является готовым концентратом, то тонкое грохочение можно отнести к самостоятельной операции. Технология стадияльного выделения концентрата с применением тонкого грохочения, как правило, используется перед последней стадией измельчения, но она может быть осуществима уже после первой стадии измельчения (при использовании шаровой мельницы).

Размер отверстий сит гидравлических грохотов для тонкого грохочения магнетитовых промпродуктов и концентратов зависит от стадии измельчения и обогащения и от размера зёрен магнетита.

При измельчении и магнитном обогащении классы крупности промпродуктов различаются по массовой доле железа уже после первой стадии измельчения в стержневых мельницах (см. табл. 5.5). Максимальный размер частиц после первой стадии измельчения магнетитовых руд составляет 3 (до 5) мм. Если осуществлять грохочение промпродукта ММС-I после стержневой мельницы, то максимальный размер отверстия сита не будет превышать 1 мм.

Минимальный размер отверстия сита ограничивается техническими возможностями. Например, минимальный размер сит грохотов 2SG48-60W-5STK корпорации «Derrick», применяемых на магнетитообогащительных фабриках России, составляет: 0,075 мм для полиуретановых панелей TH48x30-0,075MT и 0,079 мм для стальных сит типа «Сэндвич» SVG48-30 DFU 230. При этом опыт эксплуатации панелей SVG48-30 DFU 230 показал, что эффективный размер разделения на них составляет 0,045 мм. Другие производители гидравлических грохотов указывают следующие минимальные размеры сит, например: ОАО НПК «Механобр-Техника» – 0,05 мм (крупность разделения); компания «NHI» (Китай) – 0,045 мм (например, грохот GPS II-1200-3); компания «Crush Tech-

nologies Ltd» – 0,038 мм; компания «Knelson» – 0,038 мм (например, грохот PFS-44500).

Требуемый технологией обогащения минимальный размер отверстий сит для тонкого грохочения соответствует минимальному размеру рудной вкрапленности конкретного месторождения. В настоящее время перерабатываются руды с весьма тонкой вкрапленностью магнетита, а конечная крупность измельчённых продуктов достигает 92-98 % класса -45 мкм. Поэтому минимальный размер отверстий сит грохотов должен составлять 0,045-0,05 мм. Сита с такими размерами предлагают многие производители.

### **5.2.5. Повышение качества железных концентратов**

Типовые схемы обогащения железных руд, например, приведённые на рис. 5.2 и 5.3, позволяют получать рядовые и высококачественные концентраты с массовой долей железа до 60-68 %, в зависимости от промышленного типа и вещественного состава руды. Для повышения качества концентратов разработаны специальные технологии, включающие как магнитные методы обогащения, так и другие обогатительные методы.

Основными технологиями, позволяющими повысить качество железных концентратов (увеличение массовой доли железа и снижение массовой доли вредных примесей), являются:

- доизмельчение до полного раскрытия магнетита с последующим магнитным обогащением;
- флотационная доводка концентрата;
- разделение рядового концентрата по крупности (тонкое гидравлическое грохочение и классификация в гидроциклонах);
- магнитная сепарация в переменном магнитном поле.

Любая технология доводки (повышения качества) магнетитового концентрата предполагает получение кроме высококачественного концентрата труднообогатимого промпродукта.

#### *Дополнительное измельчение и магнитное обогащение концентрата*

Технология с дополнительным шаровым измельчением и магнитным обогащением рядового концентрата реализована на Лебединском ГОКе. На Лебединском ГОКе впервые в России реализована технология, позволяющая получать «суперконцентраты» с массовой долей железа не менее 69,5 % для внедо-

менного процесса получения чугуна и стали (для металлизации). Принципиальная схема фабрики доводки железного концентрата приведена на рис. 5.5.

Исходным питанием фабрики доводки является высококачественный концентрат с массовой долей железа 68-68,7 %, получаемый на фабрике № 3 по технологии самоизмельчения и мокрого магнитного обогащения.

В результате дообогащения высококачественного концентрата по традиционной технологии с шаровым измельчением и магнитной сепарации получается «суперконцентрат» с массовой долей железа не менее 69,5 % и массовой долей кремнезёма не более 3,5 %. Прирост массовой доли железа составляет 1,5-2 %.

Следует отметить, что получение «суперконцентрата» по относительно простой технологии стало возможно благодаря высокому качеству исходного концентрата (68-68,7 % Fe), высокой обогатимости магнетитовых кварцитов Лебединского месторождения и тонкой вкрапленности магнетита (0,07-0,2 мм).

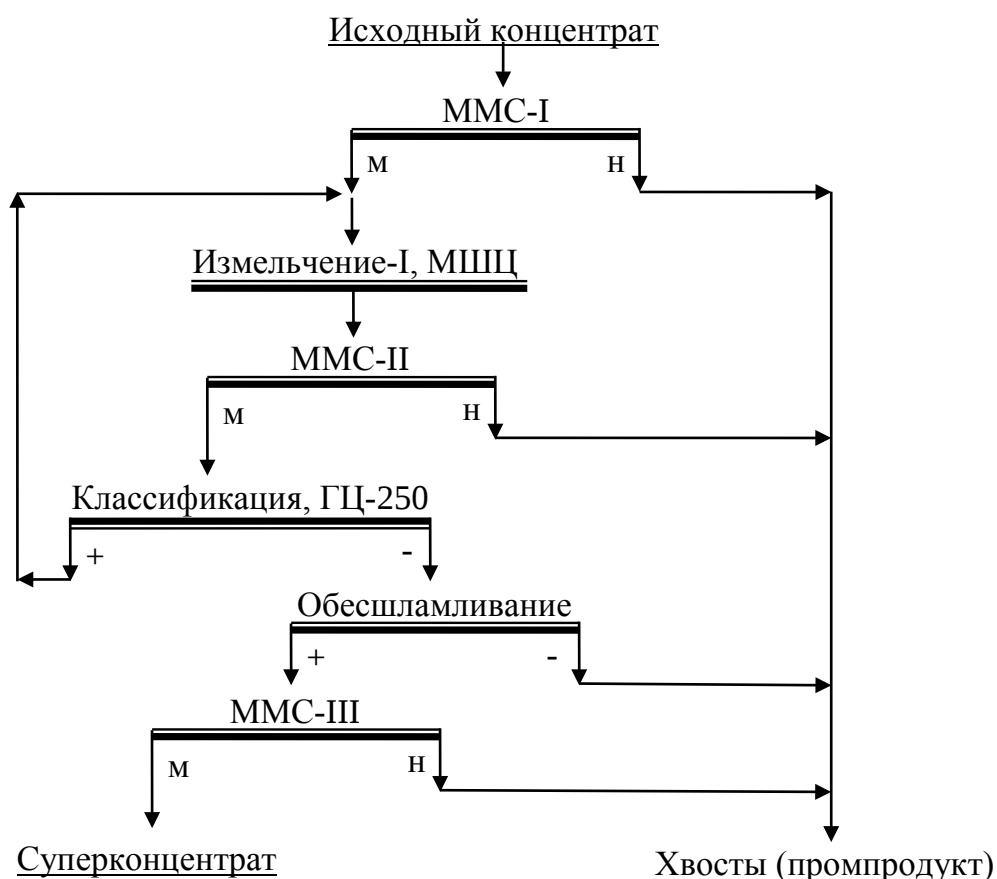


Рис. 5.5. Принципиальная схема получения «суперконцентрата» на доводочной фабрике Лебединского ГОКа

### *Флотационная доводка магнетитового концентрата*

Флотационный метод повышения качества магнетитовых концентратов применяется при обогащении железистых кварцитов. В большинстве случаев используется обратная катионная флотация, при которой в пенный продукт извлекаются кварц и силикаты [55, 65]. В качестве собирателя кварца в основном используются амины, в качестве депрессора магнетита – крахмал. Для интенсификации процесса флотации разработаны технологии с предварительной электрохимической обработкой оборотной воды и реагентов [73].

В настоящее время флотационная технология доводки магнетитовых концентратов исследована практически для всех месторождений железистых кварцитов. Технологические показатели флотационного обогащения готовых концентратов магнитного обогащения железистых кварцитов при лабораторных исследованиях приведены в табл. 5.7 [65]. Флотационное обогащение позволяет значительно повысить качество магнетитовых концентратов – массовая доля железа увеличивается на 3-4 %; массовая доля кремнезёма снижается на 3-5 %. Поэтому флотацию можно рассматривать как один из основных методов повышения качества концентратов.

Таблица 5.7

Технологические показатели флотационного обогащения концентратов [65]

| Продукт               | Выход, % | Массовая доля, % |            | Извлечение<br>железа, % |
|-----------------------|----------|------------------|------------|-------------------------|
|                       |          | железа           | кремнезёма |                         |
| Лебединский ГОК       |          |                  |            |                         |
| Концентрат (камерный) | 72,7     | 71,5             | 0,9        | 75,9                    |
| Промпродукт (пенный)  | 27,3     | 60,9             | 13,1       | 24,1                    |
| Исходный              | 100,0    | 68,6             | 4,2        | 100,0                   |
| Михайловский ГОК      |          |                  |            |                         |
| Концентрат (камерный) | 77,5     | 69,7             | 2,9        | 81,8                    |
| Промпродукт (пенный)  | 22,5     | 53,3             | 22,0       | 18,2                    |
| Исходный              | 100,0    | 66,0             | 7,2        | 100,0                   |

Однако при использовании флотационной технологии кроме высококачественного концентрата получается труднообогатимый низкокачественный промпродукт (см. табл. 5.7). Флотационное обогащение промпродукта позволяет получить низкокачественный концентрат и отвальные хвосты с повышенной массовой долей железа.

В России флотационная доводка концентратов внедрена на Михайловском ГОКе. Принципиальная схема флотационного обогащения приведена на рис. 5.6.

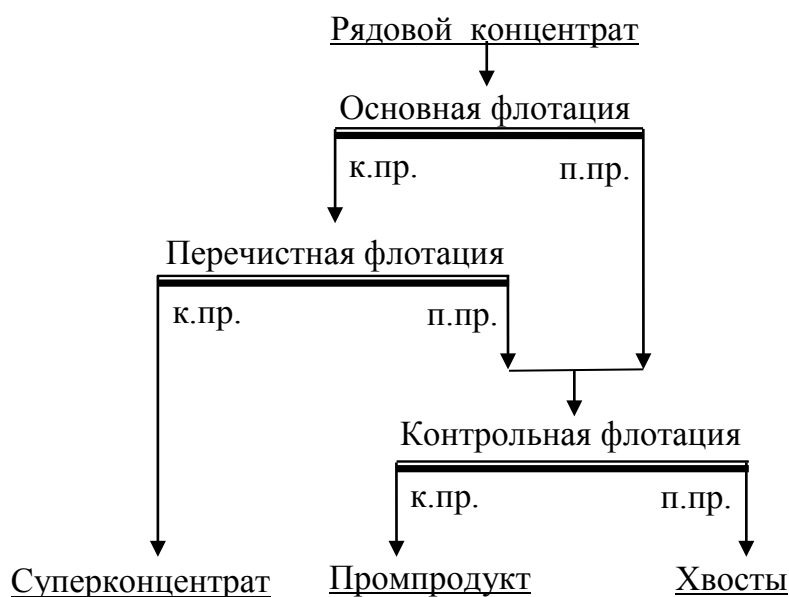


Рис. 5.6. Принципиальная флотационная схема получения «суперконцентрата» на Михайловском ГОКе:  
к.пр. – камерный продукт; п.пр. – пенный продукт

По флотационной схеме дообогащения рядового концентрата Михайловского ГОКа кроме высококачественного концентрата с массовой долей Fe и SiO<sub>2</sub> не менее 69 и не более 3-3,2 % получают промпродукт ( $\beta_{\text{Fe}} = 59-60 \%$ ) и хвосты. При этом массовая доля железа в хвостах флотации выше, чем в хвостах ММС. Промпродукт поступает на дообогащение по стандартной «магнитной» схеме с получением рядового концентрата.

Использование флотационной доводки концентрата приводит к снижению извлечения железа в концентрат. Однако это характерно не только для флотационной доводки, но и для других методов и схем доводки концентрата. Тем не менее ГОКи внедряют флотационную технологию, так как прирост цены высококачественного концентрата превышает затраты, связанные с усложнением схемы обогащения и со снижением извлечения железа в концентрат. Высококачественный флотационный концентрат применяется для внедоменного процесса получения чугуна и стали.

#### *Разделение рядового концентрата по крупности*

Закономерности распределения железа в концентратах, связанные с более высокой массовой долей железа в мелких классах крупности (см. табл. 5.3), позволяют рассматривать возможность использования метода разделения по крупности для повышения качества магнетитовых концентратов. Технология дообогащения включает разделение концентрата по крупности на грохотах для тонкого грохочения и (или) в гидроциклонах, сепарацию мелкого продукта с

получением высококачественного концентрата и доизмельчение и сепарацию крупного продукта. При этом концентрат, полученный из доизмельчённого и обогащённого крупного продукта, имеет массовую долю железа, примерно равную массовой доле железа в исходном концентрате, но ниже, чем у концентрата из мелкого продукта.

Применение гидроциклонов для повышения качества концентрата используется в схемах обогащения Оленегорского, Михайловского и Качканарского ГОКов. В схеме обогащения Костомукшского ГОКа гидроциклоны используются вместе с грохотами тонкого грохочения (рис. 5.7).

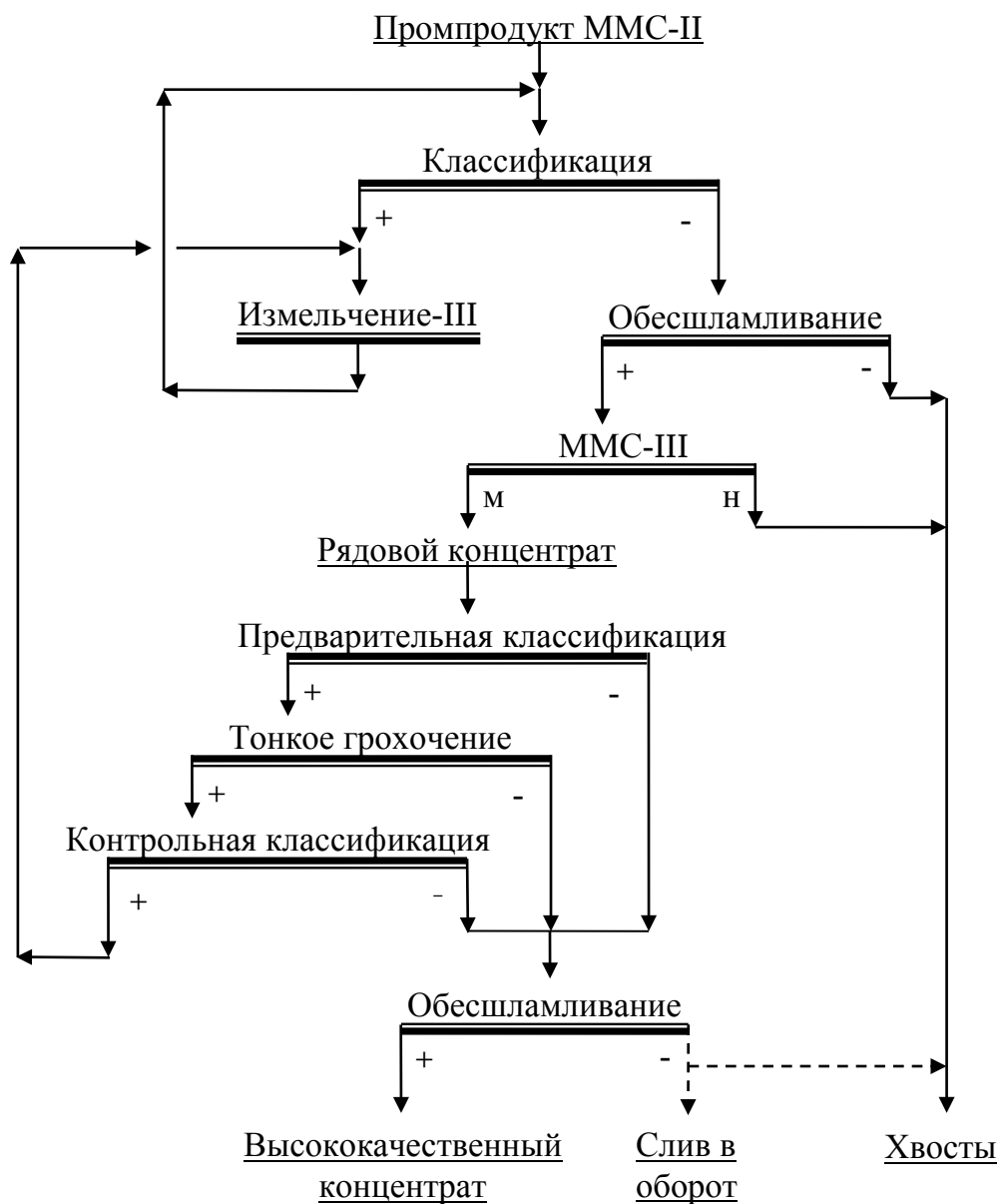


Рис. 5.7. Принципиальная схема повышения качества концентрата с помощью разделения по крупности на Костомукшском ГОКе

Применение тонкого грохочения для повышения качества магнетитового концентрата позволяет получить более высокие технологические показатели обогащения за счёт исключения попадания крупных лёгких бедных частиц в тонкую фракцию, что происходит при использовании гидроциклонов.

К настоящему времени выполнены лабораторные исследования по использованию тонкого грохочения по повышению качества концентрата для всех промышленных типов железных руд.

На Костомукшском ГОКе для повышения качества концентрата используется классификация в гидроциклонах и тонкое грохочение, что позволяет увеличить массовую долю железа в концентрате до 68 % и более. Конечным концентратом являются объединённый продукт, включающий сливы гидроциклонов и подрешётный продукт. При этом пески гидроциклонов последней доводочной операции направляются в третью (последнюю) стадию измельчения, являясь циркулирующей нагрузкой (см. рис. 5.7).

На Ковдорском ГОКе используется дообогащение концентрата рудных секций на грохотах «Derrick» ( $a=0,23$  мм), позволившее увеличить массовую долю железа в концентрате с 63,3 до 64 % и более. При этом надрешётный продукт доизмельчается и дообогащается в отдельной дополнительной стадии (рис. 5.8).

Таким образом, разделение по крупности готового железного концентрата следует рассматривать как один из основных методов повышения качества железного концентрата. Наиболее эффективным аппаратом для этой технологии является вибрационный гидравлический грохот.

#### *Магнитная сепарация в переменном магнитном поле*

Одной из причин, не позволяющей на стандартных сепараторах ПБМ получать высококачественный концентрат, является флокуляция частиц магнетита. Будучи полезной при выделении бедных отвальных хвостов, магнитная флокуляция не позволяет значительно увеличивать массовую долю железа в готовом концентрате при использовании сепараторов ПБМ.

Применение вместо стационарного магнитного поля переменных полей позволяет разрушать магнитные флокулы и пряди и высвободить из них немагнитные частицы. Это приводит к повышению качества концентрата. В качестве индуктора переменного магнитного поля в основном применяются вращающиеся системы из постоянных магнитов.

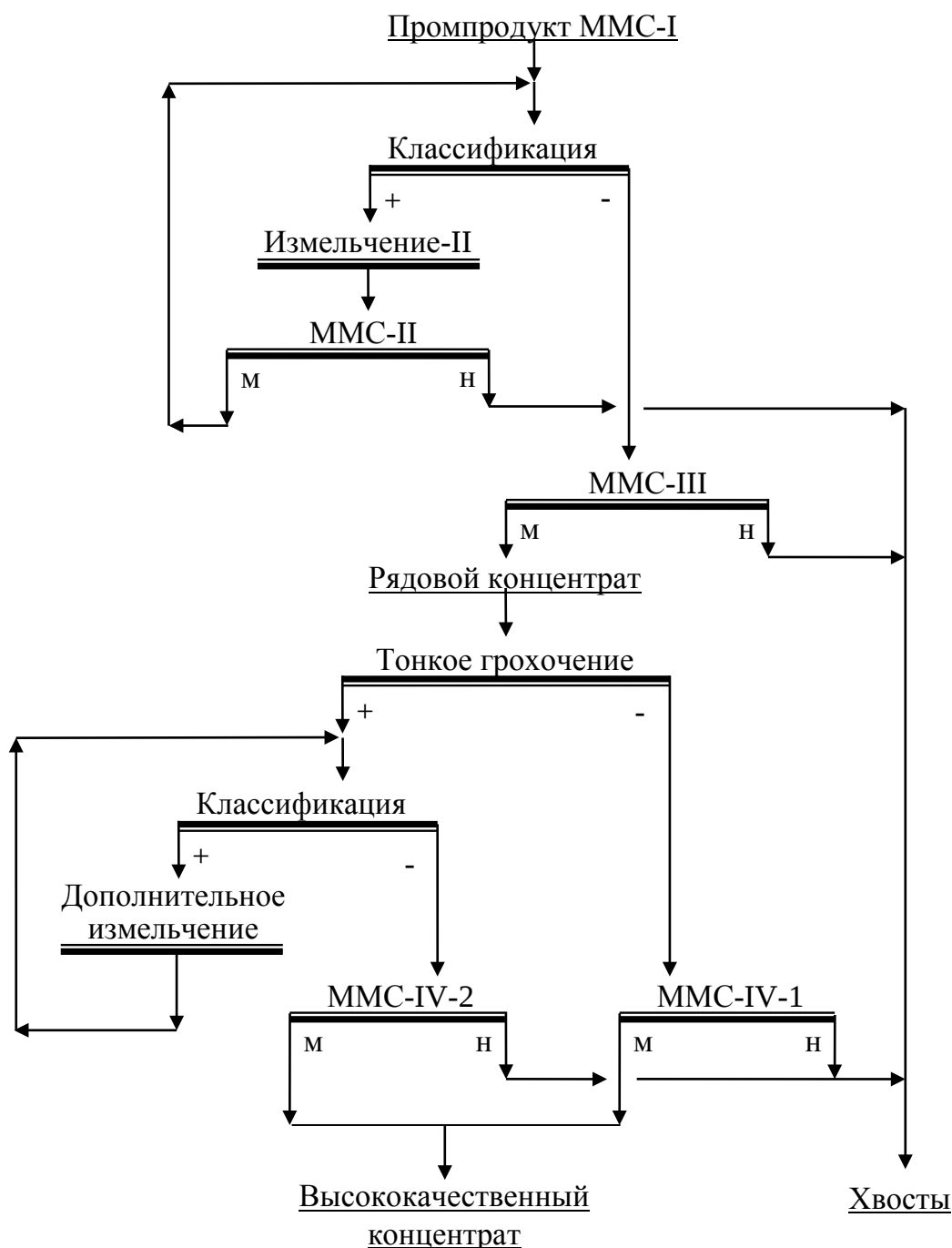


Рис. 5.8. Принципиальная схема повышения качества концентрата с помощью тонкого грохочения на Ковдорском ГОКе

Сепараторы с вращающейся внутри барабана магнитной системой из постоянных магнитов часто называют сепараторами с бегущим магнитным полем (см. рис. 4.10, *a*). В них осуществляется как сухое, так и мокрое обогащение. Конструкции таких сепараторов описаны в учебниках, монографиях, статьях и патентах, например в [19, 35, 45, 52].

В настоящее время промышленные сепараторы с бегущим магнитным полем в России не выпускаются. Промышленные и лабораторные испытания по дообогащению концентратов разных типов магнетитовых руд показали, что сепарацию в переменных магнитных полях следует рассматривать как один из методов, позволяющий получать высококачественные железные концентраты (см. табл. 4.5).

#### **5.2.6. Стадиальное выделение железного концентрата**

Одним из путей повышения эффективности схем обогащения магнетитовых руд является стадиальное выделение концентрата. Стадиальное выделение концентрата позволяет снизить затраты на последующее измельчение и несколько повышает выход концентрата и извлечение железа в концентрат [54].

Наиболее реально получать часть готового железного концентрата перед последней стадией измельчения. Например, для Качканарского ГОКа продуктом, из которого возможно получать готовый концентрат, является промпродукт операции ММС-III, направляемый в последнюю стадию измельчения. Массовая доля железа в классе -71 мкм этого продукта составляет 63,5 %, что не ниже массовой доли железа в готовом концентрате (см. табл. 5.5).

При стадиальном выделении концентрата кроме концентрата получается промпродукт, направляемый на дальнейшее измельчение и обогащение. Принципиальная схема стадиального выделения концентрата приведена на рис. 5.9.

Основными методами, позволяющими выделить готовый концентрат перед последней стадией измельчения, являются:

- гравитационное обогащение;
- магнитная сепарация в переменном магнитном поле;
- разделение по крупности (тонкое гидравлическое грохочение и классификация в гидроциклонах).

##### *Гравитационное обогащение*

Гравитационный метод можно использовать для обогащения магнетитовых руд, в том числе и для стадиального выделения концентрата, так как магнетит имеет повышенную плотность ( $5000 \text{ кг/м}^3$ ) по сравнению с минералами вмещающих пород.

Промышленное использование винтовой сепарации для стадиального выделения концентрата было осуществлено на Высокогорском ГОКе, на котором перерабатываются скарновые магнетитовые руды Тагило-Кушвинской группы

с тонкой (0,07-0,2 мм) и частично мелкой (0,2-1 мм) вкрапленностью магнетита. Винтовые сепараторы были установлены на сливе мельницы II стадии измельчения. Из слива мельницы с массовой долей железа 57 % и крупностью 25-30 % класса  $-0,071+0$  мм получен концентрат (тяжёлый продукт) с массовой долей железа 63,5 % при выходе до 20 % от операции. Легкий продукт направляли на классификацию в гидроциклоны с получением песков и слива. Пески направляли на доизмельчение, а из слива с помощью магнитной сепарации получали второй концентрат. Кроме этого винтовые сепараторы испытывались на промпродукте ММС-I перед последней (второй) стадией измельчения [43].



Рис. 5.9. Принципиальная схема стадийного выделения концентрата

Высокогорским ГОКом показана возможность стадийного получения готового концентрата не магнитным методом, а гравитационным — винтовой сепарацией [54].

#### *Магнитная сепарация в переменном магнитном поле*

Применение барабанных сепараторов с бегущим магнитным полем для стадийного выделения концентрата испытано как в лабораторных, так и в промышленных условиях.

В табл. 5.8 приведены результаты обогащения в лабораторном сепараторе с бегущим магнитным полем ПБМ-Б-28/12-ПП магнитного продукта операции ММС-III ОФ КГОКа (исходный продукт на III стадию измельчения). Опыты

показали высокую эффективность разделения и возможность получения готового концентрата. Применительно к титаномагнетитовой руде Гусевогорского месторождения сепаратор с бегущим магнитным полем позволяет получить железный концентрат с выходом от операции до 80 % перед последней стадией измельчения. Массовая доля железа в немагнитном продукте сепаратора ПБМ-Б-28/12-ПП составила 33,9-39,4 %, что не позволяет отправить этот продукт в хвосты и требует его измельчения и обогащения.

Таблица 5.8

Результаты обогащения в лабораторном сепараторе ПБМ-Б-28/12-ПП магнитного продукта ММС-III ОФ Качканарского ГОКа

| Продукт                               | Выход, % | Массовая доля Fe, % | Извлечение Fe, % |
|---------------------------------------|----------|---------------------|------------------|
| Удельная производительность 4 т/(ч·м) |          |                     |                  |
| Магнитный                             | 81,57    | 61,1                | 87,28            |
| Немагнитный                           | 18,43    | 39,4                | 22,72            |
| Исходный                              | 100,0    | 57,1                | 100              |

Промышленные испытания, выполненные на Лебединском ГОКе под руководством проф. Кармазина В. В., показали высокую эффективность сепаратора с бегущим магнитным полем при стадийном выделении готового железного концентрата [46]. Разработка промышленного высокопроизводительного сепаратора позволит рассматривать метод обогащения в переменных магнитных полях как один из основных и наиболее эффективных методов для стадийного выделения концентрата.

#### *Разделение по крупности*

Повышенная массовая доля железа в мелких классах магнетитовых продуктов (см. табл. 5.5) позволяет рассматривать разделение по крупности в качестве одного из методов для стадийного выделения концентрата. Разделение по крупности измельчённых продуктов можно осуществлять либо в грохотах, либо в гидроциклонах. Применение вибрационных гидравлических грохотов позволяет достигать более высоких технологических показателей.

В табл. 5.9 приведены результаты испытаний применения грохотов «Der-giick» и барабанных магнитных сепараторов с модифицированной ванной для стадийного выделения концентрата перед последней стадией измельчения ОФ Качканарского ГОКа, показывающие большую эффективность применения грохотов [59]. Для условий ОФ Качканарского ГОКа, применение тонкого грохочения позволило не только повысить массовую долю железа в концентрате для производства агломерата и извлечение железа в концентрат (см. табл. 5.10), но и увеличить производительность технологической секции на 5-8 %.

Таблица 5.9

Технологические показатели разделения в аппаратах для стадийного выделения концентрата

| Продукт                                                   | Выход от операции, % | Массовая доля, % |           | Извлечение Fe от операции, % |
|-----------------------------------------------------------|----------------------|------------------|-----------|------------------------------|
|                                                           |                      | Fe               | -0,071 мм |                              |
| Барабанный сепаратор с модифицированной ванной ПБМ-90/250 |                      |                  |           |                              |
| Магнитный                                                 | 22,2                 | 61,8             | 59,4      | 23,1                         |
| Немагнитный                                               | 77,8                 | 58,6             | 55,8      | 76,9                         |
| Исходный                                                  | 100,0                | 59,3             | 56,6      | 100,0                        |
| Грохот 2SG48-60W-5STK (Derrick), $a=0,15$ мм              |                      |                  |           |                              |
| Подрешётный                                               | 50,8                 | 62,0             | 79,9      | 54,3                         |
| Надрешётный                                               | 49,2                 | 53,9             | 33,6      | 45,7                         |
| Исходный                                                  | 100,0                | 58,0             | 57,1      | 100,0                        |

Таблица 5.10

Показатели схем обогащения ОФ Качканарского ГОКа

| Массовая доля Fe<br>в руде, %                                     | Выход, % | Массовая доля в концентрате, % |         | Извлечение Fe, % |
|-------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------|---------|------------------|
|                                                                   |          | Fe                             | -71 мкм |                  |
| Существующая схема                                                |          |                                |         |                  |
| 15,6                                                              | 17,51    | 60,80                          | 85,0    | 68,24            |
| Схема со стадийным выделением концентрата (грохоты с $a=0,15$ мм) |          |                                |         |                  |
| 15,8                                                              | 17,59    | 61,93                          | 77,1    | 68,93            |

Схемы со стадийным выделением концентрата перед последней стадией измельчения при использовании грохотов приводят к увеличению крупности готового концентрата.

Величина отверстия сита грохота ( $a$ ) при стадийном выделении магнетитового концентрата перед последней стадией измельчения зависит от размера рудной вкрапленности, что проиллюстрировано на рис. 5.10.

Для руд с дисперсной ( $<0,03$  мм) и весьма тонкой вкрапленностью ( $0,03-0,07$  мм) –  $a < 0,1$  мм; для руд с весьма тонкой и тонкой вкрапленностью ( $0,07-0,2$  мм) –  $a \leq 0,15$  мм; для руд с тонкой и частично мелкой вкрапленностью ( $0,2-1,0$  мм) –  $a \leq 0,18$  мм; для руд с преобладанием мелкой вкрапленности –  $a \leq 0,23$  мм.

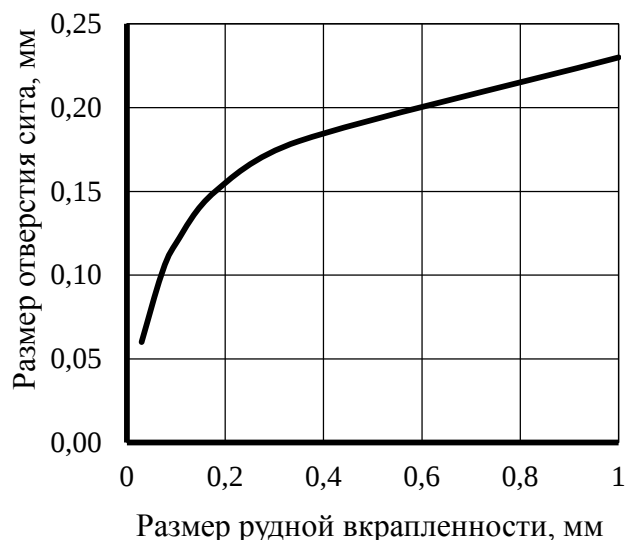


Рис. 5.10. Зависимость размера отверстия сита грохота при стадийном выделении концентрата от размера рудной вкрапленности

### 5.3. Обогащение слабомагнитных руд

К слабомагнитным рудам, обогащаемым магнитными методами, относятся железные руды (мартитовые, гематитовые, бурожелезняковые, сидеритовые), марганцевые руды, титансодержащие руды и россыпи. Кроме того, магнитные методы применяют в схемах доводки вольфрамowych концентратов и иногда в схемах обогащения других руд.

Для обогащения слабомагнитных руд применяют сепараторы с сильным магнитным полем – валковые и высокоградиентные с электромагнитной системой и сепараторы с системами из редкоземельных магнитов.

Схемы обогащения слабомагнитных железных руд можно разделить на три вида: 1) магнитные схемы с использованием сепараторов с сильным магнитным полем; 2) комбинированные схемы с использованием кроме магнитного метода других методов обогащения (гравитационных, флотационных, электрических); 3) обжигмагнитные схемы с использованием сепараторов со слабым магнитным полем.

Схемы обогащения 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 применяют валковые и высокоградиентные сепараторы с замкнутой магнитной системой, 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 немагнитных частиц (древесина, резина и др.), которые могут перекрыть рабочую зону сепаратора.

Наличие сильномагнитного магнетита и аппаратного железа 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 сепарацией в сильном магнитном поле желательно предусматривать операцию магнитной сепарации в слабом поле для выделения магнетита и других сильномагнитных частиц.

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 перечистные операции для магнитного продукта. Схемы, как правило, линейны без циркуляции продуктов обогащения.

### **5.3.1. Обогащение гематитсодержащих руд**

Гематит относится к слабомагнитным минералам. Плотность гематита составляет 4900-5100 кг/м<sup>3</sup>. Поэтому в схемах обогащения гематитовых руд применяют высокоградиентную магнитную сепарацию и аппараты для гравитационного обогащения, а также флотационный метод обогащения.

#### **Магнитные схемы обогащения**

Если в исходной руде низкое содержание слабомагнитных породных минералов, то с помощью магнитной сепарации получают готовый концентрат. К таким рудам можно отнести богатые итабиритовые руды Бразилии (массовая доля железа 35-60 %) и магнетит-гематитовые разновидности гематитовых кварцитов России (см. табл. 3.10, проба № 2).

Если в исходной руде высокое содержание слабомагнитных породных минералов, то с помощью магнитной сепарации получают черновой гематитовый концентрат, который дообогащают с помощью других методов (гравитационных, флотационных, электрических). К таким рудам относятся железистые кварциты, преимущественно силикат-гематит-магнетитовой разновидности.

На рис. 5.11 приведена технологическая схема обогащения гематитовой итабиритовой руды с применением высокоградиентных сепараторов Джонса [34]. В схеме используется только магнитный метод обогащения.

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 типа ПБМ) для извлечения сильномагнитного магнетита и аппаратного железа. Немагнитный продукт барабанных сепараторов поступает на сгущение и далее на гидравлическое грохочение для удаления из пульпы крупных немагнитных 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 нужно для нормальной работы сепаратора Джонса и для повышения его производительности.

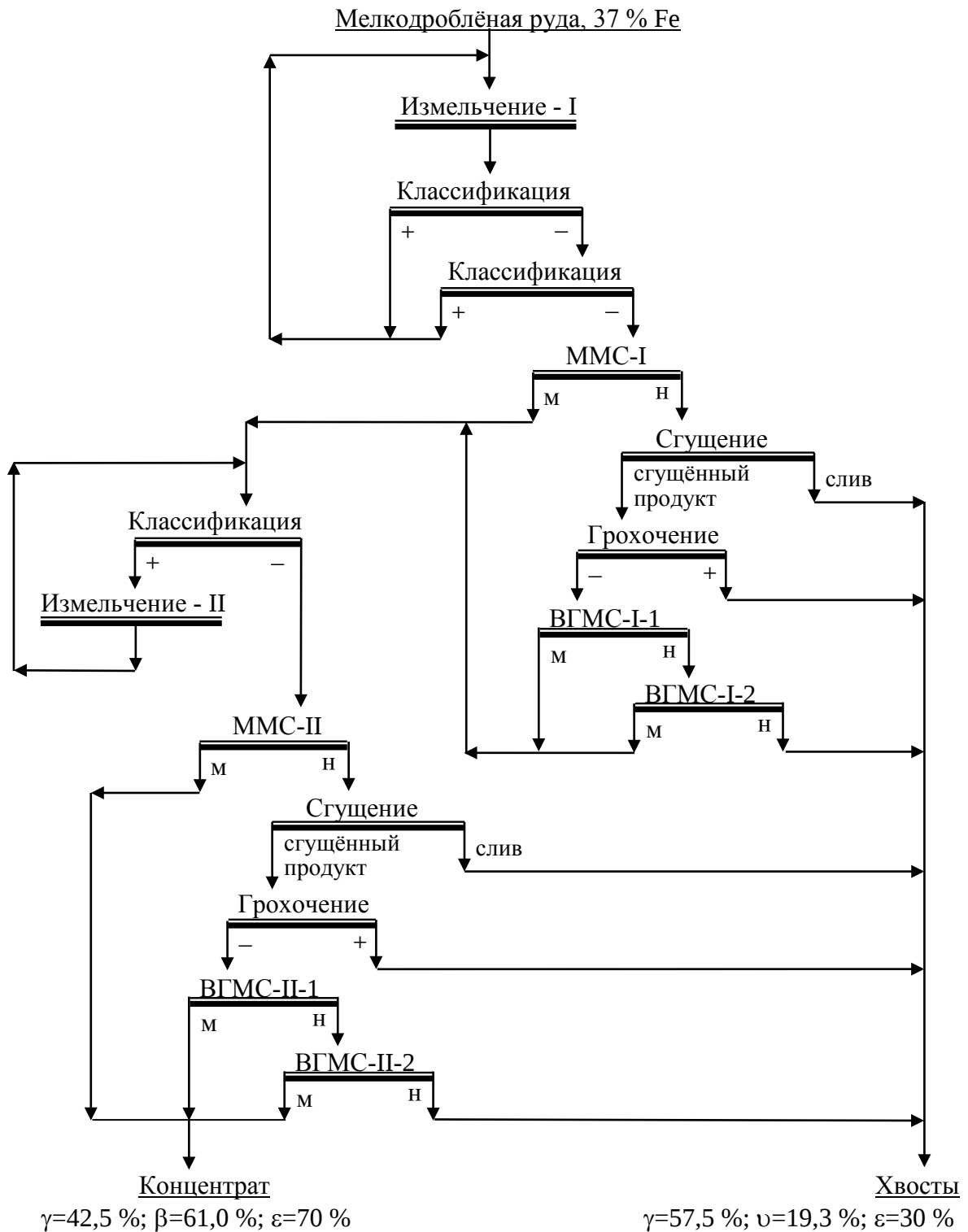


Рис. 5.11. Принципиальная схема обогащения гематитовой итабиритовой руды с применением высокоградиентных сепараторов Джонса

## Магнитно-гравитационные схемы обогащения

Гематитовый концентрат с использованием гравитационных методов обогащения (отсадки) в России получают только на Оленегорском ГОКе [68], при этом только из гематит-магнетитовой руды Оленегорского месторождения (из железистых кварцитов). По размеру зёрен гематита (0,07 – 0,9 мм) руда Оленегорского месторождения относится к мелкокрапленной гематитсодержащей руде. Это позволяет использовать высокопроизводительные отсадочные машины для получения гематитового концентрата.

Схема включает циклы получения магнетитового и гематитового концентратов (рис. 5.12). Магнетитовый цикл осуществляется по традиционной схеме обогащения магнетитовых руд с применением барабанных сепараторов ПБМ со слабым магнитным полем. Немагнитные продукты сепараторов ПБМ после сгущения и обесшламливания в гидроциклонах поступают в диафрагмовые отсадочные машины. Отсадка осуществляется в две операции – основной и контрольной. Лёгкие продукты отсадки направляются в хвосты.

Применение отсадочных машин позволяет получить гематитовый концентрат с массовой долей железа 60 % и крупностью более 0,071 мм. Более мелкий гематит не извлекается и уходит в хвосты фабрики со сливами гидроциклонов и лёгкими продуктами отсадочных машин.

Несмотря на имеющиеся положительные результаты исследований по возможности получения гематитового концентрата из продуктов крупностью менее 0,071 мм, эти технологии не получили применения. Это связано со следующими основными причинами: низкое качество гематитового концентрата и его выход и низкая производительность гравитационного оборудования при обогащении частиц крупностью менее 0,071 мм.

В гематитовом концентрате крупностью менее 0,071 мм, получаемом из железистых кварцитов, массовая доля железа составляет 50-61 %. Кроме этого, в таком концентрате может быть повышенная массовая доля вредных примесей (S, P, SiO<sub>2</sub> и др.). Поэтому предполагаемое смешивание низкокачественного гематитового концентрата с магнетитовым концентратом может привести к снижению качества суммарного железного концентрата обогатительной фабрики.

Для извлечений гематита крупностью менее 0,071 мм из железистых кварцитов разработаны магнитно-гравитационные и магнитно-флотационные схемы.

Принципиальная схема получения гематитового концентрата из железистых кварцитов Кимканского и Сутарского месторождений с использованием

тонкого грохочения, высокоградиентной магнитной сепарации и гравитационного обогащения на шламовых концентрационных столах (лабораторные испытания) приведена на рис. 5.13.

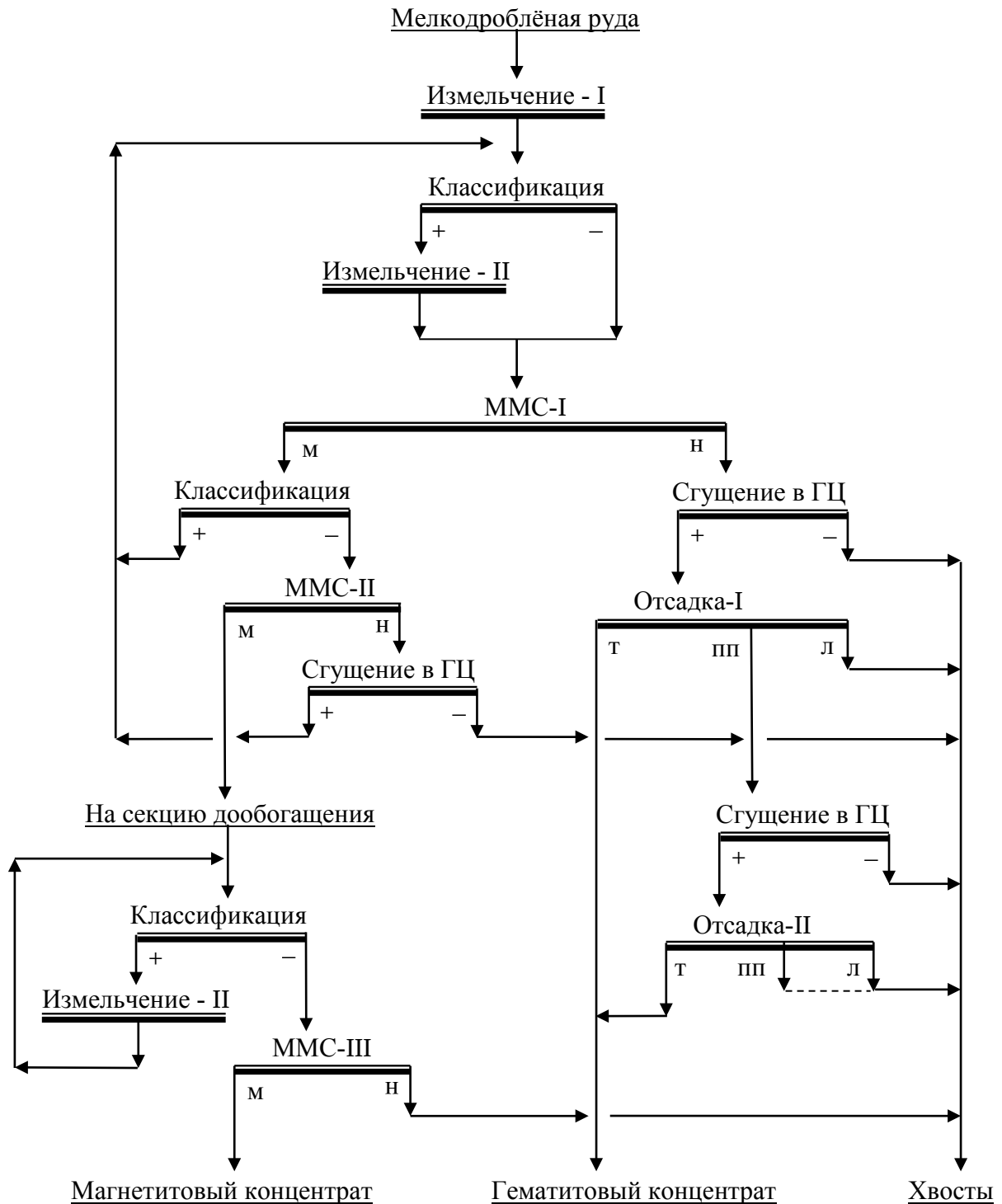


Рис. 5.12. Принципиальная схема обогащения гематит-магнетитовой руды Оленегорского месторождения:  
т – тяжёлый продукт; л – лёгкий продукт; пп – промежуточный продукт

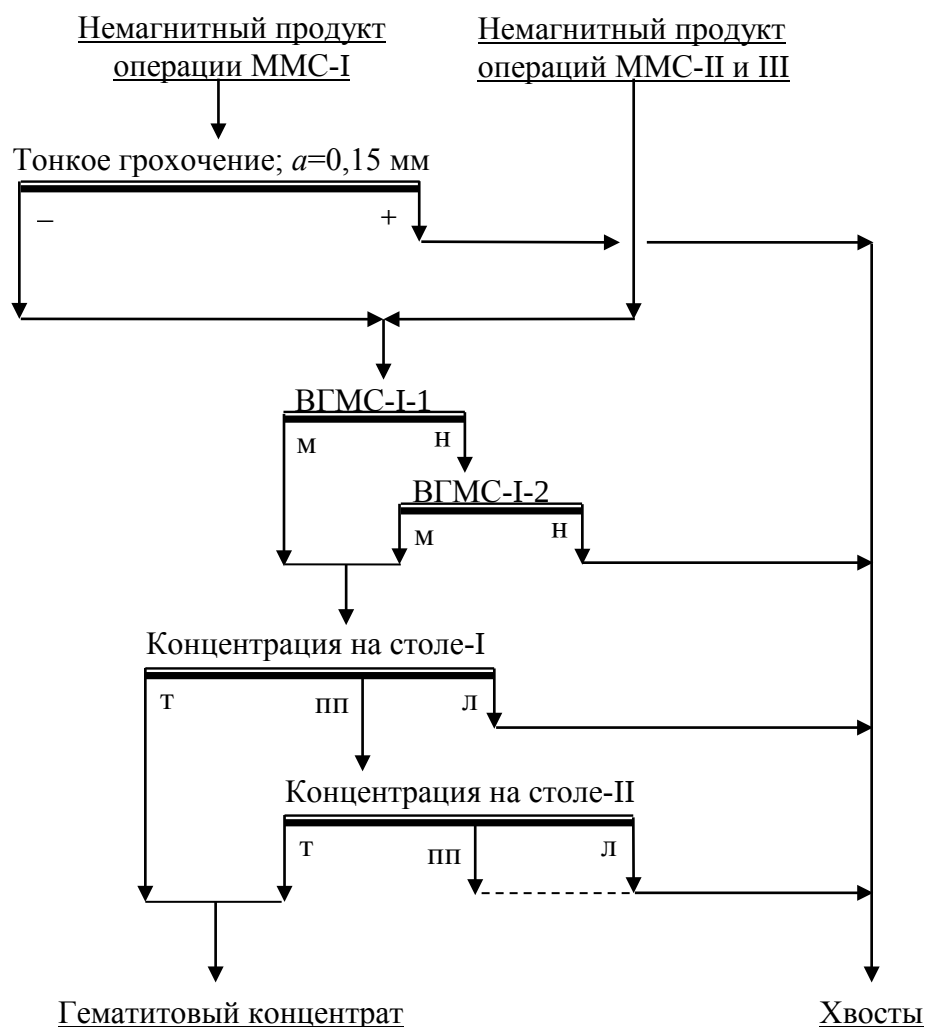


Рис. 5.13. Принципиальная схема получения гематитового концентрата из железистых кварцитов Кимканского и Сутарского месторождений

Питанием схемы являются немагнитные продукты мокрого магнитного обогащения цикла получения магнетитового концентрата в барабанных сепараторах ПБМ со слабым магнитным полем. С помощью тонкого грохочения выводятся в хвосты крупные породные частицы и сrostки.

Использование высокоградиентной сепарации позволяет получить только черновой гематитовый концентрат, так как в магнитный продукт извлекаются не только гематит, но и другие слабомагнитные минералы (амфиболы куммингтонит и грюнерит) и сrostки кварца с гематитом и магнетитом.

Гематитовый концентрат с массовой долей железа (до 62 %) получается с использованием шламовых концентрационных столов, так как гематит имеет преимущественно весьма тонкую вкрапленность (0,03-0,071 мм).

Несмотря на полученные результаты, разработанная схема не принята к использованию на Кимкано-Сутарском ГОКе в связи с низкой производительностью шламовых концентрационных столов.

### **Магнитно-флотационные схемы обогащения**

Флотационный метод извлечения гематита крупностью менее 0,071 мм из немагнитных продуктов мокрой магнитной сепарации в слабом магнитном поле применяется при обогащении железистых кварцитов. По этой технологии из гематит-магнетитовых кварцитов с помощью магнитных сепараторов ПБМ получают магнетитовый концентрат, а из немагнитных продуктов обогащения в слабом магнитном поле с помощью флотации получают гематитовый концентрат. Магнетитовый и гематитовый концентраты смешиваются (рис. 5.14).

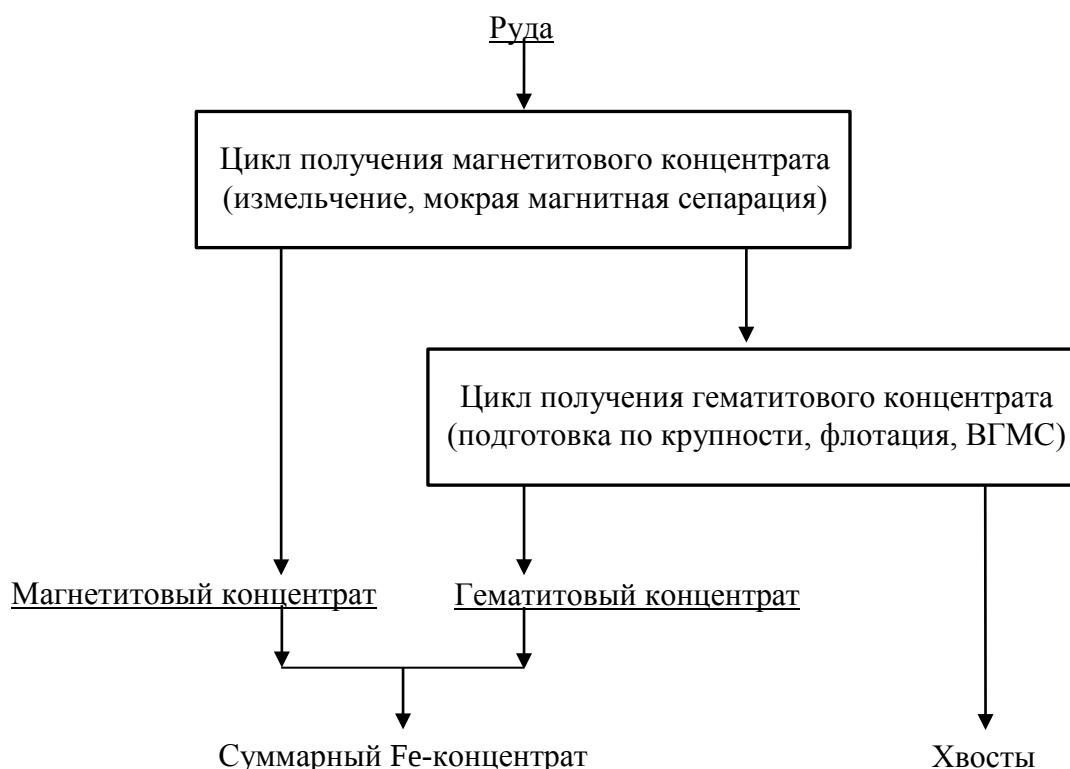


Рис. 5.14. Принципиальная схема получения гематитового концентрата из железистых кварцитов с помощью флотации

В большинстве случаев используется обратная катионная флотация, при которой в пенный продукт извлекаются кварц и силикаты, а камерный продукт представлен гематитом. В лабораторных условиях испытаны комбинированные схемы флотации с высокоградиентной сепарацией и чисто флотационные схемы, показавшие возможность получения гематитового концентрата с массовой долей железа более 60 % [65].

В России флотационная технология получения гематитового концентрата (без использования ВГМС) апробирована в промышленных условиях на Михайловском ГОКе [18, 65]. Получен низкокачественный гематитовый концентрат с массовой долей железа 57 % при низком выходе. Это связано с высоким содержанием породных частиц и сростков в питании флотации, представленных в основном кварцем и железосодержащими силикатами, и с низкой крупностью раскрытых зёрен гематита (преимущественно менее 0,045 мм). При этом смешивание магнетитового и гематитового концентратов привело к снижению качества суммарного концентрата.

Повышение качества гематитового концентрата, получаемого из гематит-магнетитовых руд с весьма тонкой вкрапленностью гематита, является актуальной задачей, не решённой в настоящее время в промышленности. Разрабатываются новые комбинированные схемы с использованием не только обогащительных процессов (магнитных, гравитационных, флотационных), но и методов разделения по крупности (обесшламливание, классификация, тонкое грохочение), позволяющих подготовить исходный продукт перед обогащением [47].

### **5.3.2. Обжиг-магнитное обогащение**

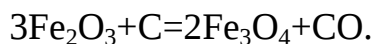
Обжиг – процесс термической обработки руд без их расплавления с целью изменения физических свойств и химического состава обжигаемого материала.

Применительно к железным рудам обжиг является подготовительной операцией, позволяющей перевести слабомагнитные минералы и соединения железа (гематит, мартит, лимонит, сидерит и др.) в сильномагнитные соединения (искусственные магнетит или маггемит). При этом изменяется химический состав соединений железа и повышается их магнитная восприимчивость до уровня сильномагнитных минералов. Такой обжиг называют магнетизирующим.

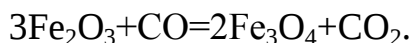
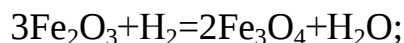
Это позволяет после магнетизирующего обжига для получения железного концентрата использовать магнитную сепарацию в слабом магнитном поле вместо магнитной сепарации в сильном поле и приводит к получению концентрата более высокого качества.

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

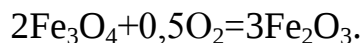
При *восстановительном* обжиге происходит восстановление слабомагнитных окислов железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) до сильномагнитных окислов. В качестве восстановителей применяют бурый уголь, антрацит, коксик, доменный, генераторный и природный газы, мазут. При использовании бурого угля, антрацита и коксика обжиг проводится при температуре 800-950 °С по уравнению:



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

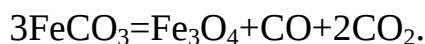


*Восстановительно-окислительный* обжиг заключается в восстановлении слабомагнитных окислов железа до магнетита с последующим окислением магнетита до сильномагнитного маггемита ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) по уравнению:



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-магнитные схемы состоят из операции магнетизирующего обжига дроблёной руды и последующего измельчения и мокрого обогащения в сепараторах со слабым полем типа ПБМ. Принципиально схемы магнитного обогащения обожжённой руды не отличаются от схем обогащения сильномагнитных магнетитовых руд, так как полученный после обжига искусственный магнетит или маггемит имеет магнитную восприимчивость, лишь немного меньшую, чем природные минералы.

Особенностью схем является использование размагничивания пульпы, вследствие большей магнитной жесткости искусственного магнетита и маггемита по сравнению с природными минералами (см. табл. 3.4).

Себестоимость железного концентрата, полученного по обжиг-магнитной схеме выше себестоимости концентрата, получаемого из сильномагнитных руд вследствие затрат на обжиг. Обжиг-магнитные схемы использованы для обогащения окисленных железистых кварцитов на ЦГОКе (Украина), бурожелезняковых руд на Лисаковском ГОКе (Казахстан), сидеритовых руд Бакальского месторождения (Челябинская обл.).

Сидеритовые руды Бакальского месторождения (Южный Урал) после обжига перерабатывают по схеме с сухой магнитной сепарацией. Мелкодроблёная руда (0-60 мм) подвергается грохочению на сите 13 мм. Подрешётный продукт является товарным и используется в качестве аглоруды при производстве агломерата. Надрешётный продукт подвергается обжигу в шахтных печах при температуре 950-1150 °С. Обожжённый продукт подвергается сухой магнитной сепарации в барабанных сепараторах со слабым магнитным полем с получением магнитного продукта с массовой долей железа 48 %. В дальнейшем магнитный продукт используется в качестве доменной руды или после додробливания в качестве аглоруды.

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

### **5.3.3. Обогащение ильменитсодержащих руд и россыпей**

Ильменит относится к слабомагнитным минералам. Плотность ильменита составляет 4500-4800 кг/м<sup>3</sup>. Поэтому в схемах обогащения ильменитовых руд применяется магнитная сепарация и аппараты для гравитационного обогащения. При обогащении ильменитсодержащих руд также используется флотация.

#### **Обогащение ильменитсодержащих руд**

Ильменитсодержащие руды по мере увеличения в них массовой доли ильменита делятся на титаномагнетитовые, ильменит-титаномагнетитовые, титаномагнетит-ильменитовые и собственно ильменитовые [3].

В основном руды классифицируются по массовой доле в них  $\text{TiO}_2$ .

*Титаномагнетитовые* руды характеризуются низкой массовой долей  $\text{TiO}_2$  (1-3 %) по сравнению с массовой долей железа (15-30 %). Ильменит из титаномагнетитовых руд не извлекают, так как массовая доля ильменита в рудах весьма низкая (непромышленная). При обогащении этих руд получают только титаномагнетитовый концентрат. К этому типу руд относятся Гусевогорское и Собственно Качканарское месторождения (Свердловская обл.).

*Ильменит-титаномагнетитовые* руды характеризуются промышленным значением  $\text{TiO}_2$  (5-7 %). Из этих руд получают два концентрата – титаномагнетитовый и ильменитовый. При этом выход титаномагнетитового концентрата значительно превышает выход ильменитового концентрата. К этому типу руд относится Копанское месторождение (Челябинская обл.).

*Титаномагнетит-ильменитовые* руды характеризуются повышенной массовой долей  $\text{TiO}_2$  (7-15 %). Из этих руд получают также два концентрата – титаномагнетитовый и ильменитовый. При этом выход ильменитового концентрата сопоставим с выходом титаномагнетитового концентрата. К этому типу руд относятся месторождения: Медведевское (Челябинская обл.), Большой Сейим и Куранахское (Амурская обл.).

*Собственно ильменитовые* руды характеризуются существенным превышением массовой доли ильменита над массовой долей титаномагнетита в руде. Поэтому выход титаномагнетитового концентрата значительно ниже выхода ильменитового концентрата. В основном собственно ильменитовые руды представлены не отдельными месторождениями, а отдельными участками месторождений титаномагнетит-ильменитовых руд, например на Медведевском месторождении.

Массовая доля диоксида титана в ильменитовом концентрате должна быть не ниже 42 %. Высококачественным считается концентрат с массовой долей  $\text{TiO}_2$  более 48 %. Массовые доли вредных примесей:  $\text{SiO}_2 < 4 \%$ ;  $\text{P} < 0,1 \%$ ;  $\text{S} < 0,5 \%$ .

Принципиальная схема обогащения ильменитсодержащих руд приведена на рис. 5.15. Схема включает цикл получения титаномагнетитового концентрата и цикл получения ильменитового концентрата.

Титаномагнетитовый концентрат получают с помощью мокрой магнитной сепарации в слабом поле в барабанных сепараторах после измельчения руды. Немагнитные продукты барабанных сепараторов поступают в цикл получения ильменитового концентрата с использованием комбинированных схем обогащения.

На Кусинской обогатительной фабрике (Челябинская обл.) использовалась гравитационно-флотационная схема (в настоящее время фабрика не работает). На концентрационных столах получался черновой концентрат, который затем дообогащался на флотационных машинах с получением товарного ильменитового концентрата.

На Олёкминской обогатительной фабрике (Амурская обл.), введённой в эксплуатацию в 2008 г., использовалась магнитно-электрическая схема. С помощью высокоградиентных магнитных сепараторов получался черновой ильменитовый концентрат, который затем дообогащался на электрических сепараторах с получением товарного ильменитового концентрата.

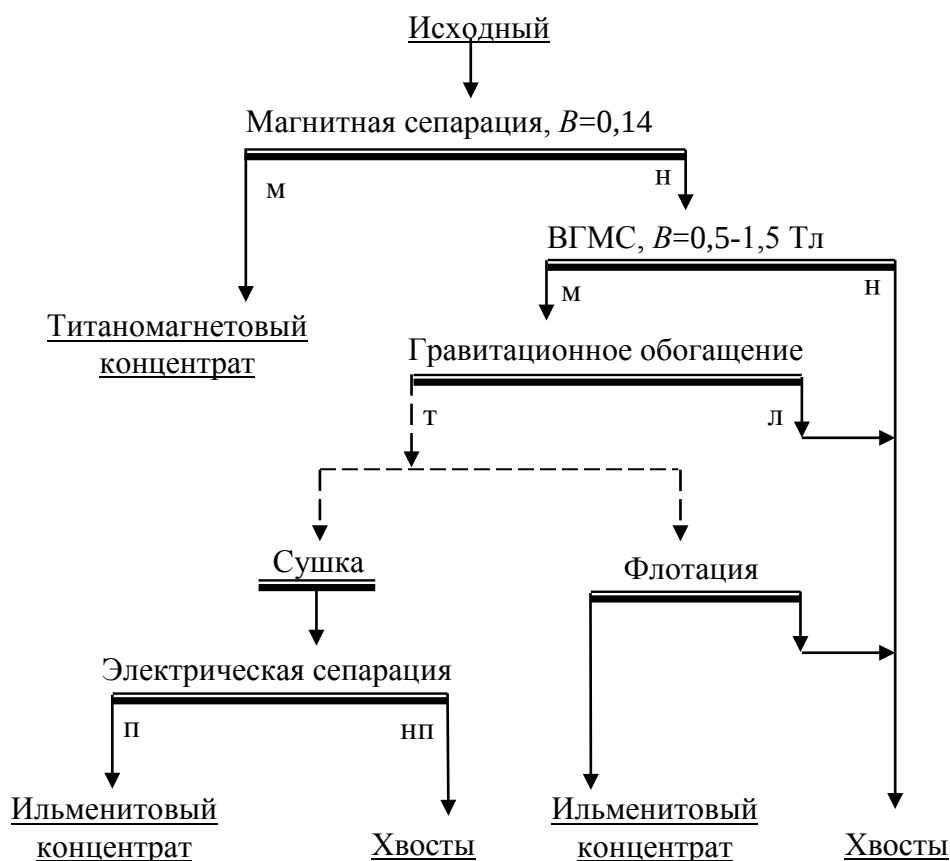


Рис. 5.15. Принципиальная схема обогащения ильменитсодержащих руд:  
п – проводники; НП – непроводники

Особенностью схемы рудоподготовки Олёкминской фабрики является использование тонкого грохочения в замкнутом цикле измельчения для снижения ошламования ильменита.

На Китайских обогатительных фабриках для получения ильменитового концентрата в основном используется магнитно-флотационная схема: на высокоградиентных сепараторах типа «Slon» получают черновой концентрат, из которого с помощью флотации получают товарный ильменитовый концентрат. В схемах рудоподготовки широко используется тонкое грохочение в замкнутых циклах измельчения.

## Обогащение ильменитсодержащих россыпей

Россыпные месторождения образуются за счёт разрушения коренных месторождений и представлены в основном песком различной крупности. Особенностью песков россыпного месторождения является наличие большого количества свободных частиц минералов практически при отсутствии сростков. Поэтому россыпи перед обогащением не измельчают.

Ильменитсодержащие россыпи называют титан-циркониевые, так в них кроме ильменита содержатся другие полезные минералы, в том числе циркон и другой титансодержащий минерал – рутил.

Полезные минералы в россыпях имеют большую плотность, чем минералы породы, поэтому их предварительно обогащают гравитационными методами (на винтовых сепараторах) с получением коллективного концентрата. В дальнейшем осуществляется разделение коллективного черного 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 титан-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. 3.8), Магнетит извлекают в слабом магнитном поле ( $B=0,16$  Тл), ильменит и ставролит – в сильном магнитном поле ( $H=0,5-1,2$  Тл), а для извлечения монацита применяют весьма сильное магнитное поле ( $H$  до 2 Тл).

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

Если в коллективном гравитационном концентрате содержится много магнитных минералов (магнетит, ильменит), то применяют схемы с магнитной сепарацией в начале процесса (рис. 5.16, *а*). Если в гравитационном концентрате содержится большое количество не проводящих электричество минералов (циркон, ставролит, монацит), то применяют схемы с электрической сепарацией в начале процесса (рис. 5.16, *б*). Во всех схемах обогащения гравитационного коллективного концентрата применяется магнитная сепарация с последовательным увеличением индукции магнитного поля сепараторов для выделения различных минералов.

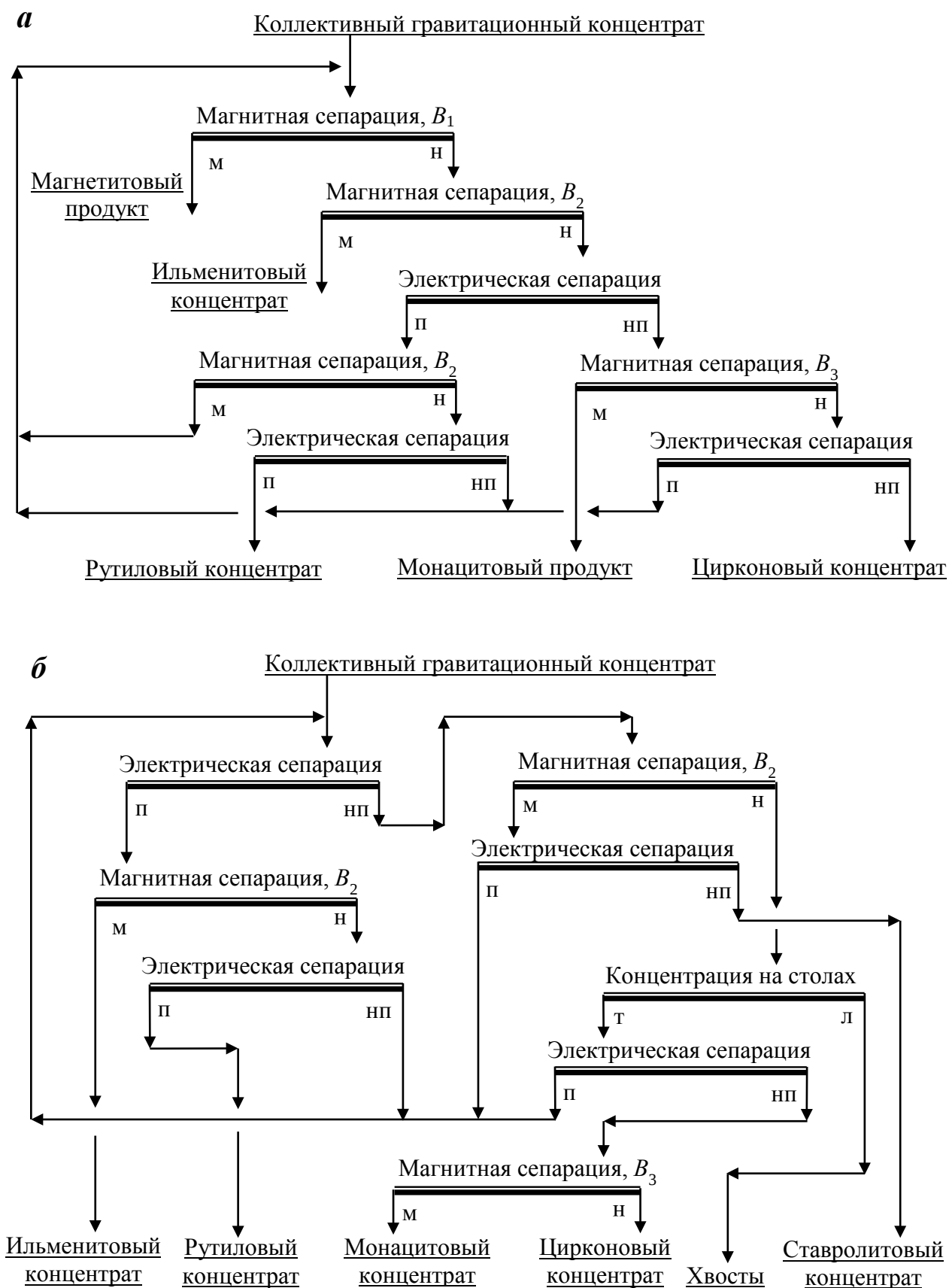


Рис. 5.16. Принципиальная схема обогащения титан-циркониевых россыпей:  
 а – с магнитной сепарацией в начале схемы; б – с электрической сепарацией в начале схемы  
 (операции сушки не показаны);  $B$  – индукция магнитного поля ( $B_1 < B_2 < B_3$ )

### 5.3.4. Обогащение других руд и нерудного сырья

Магнитное обогащение нашло широкое применение при обогащении различных руд и другого сырья и продуктов, в том числе и в не горнодобывающей промышленности.

#### *Магнитное обогащение марганцевых руд*

При обогащении марганцевых руд широко применяются комбинированные гравитационно-магнитно-флотационные схемы. В технологических схемах гравитационные методы (отсадка, реже тяжелосредная сепарация) применяются для крупных классов крупности +2 (4) мм, мокрая магнитная сепарация используется для мелких обесшламленных классов крупности –2(4) мм, флотация применяется для тонких продуктов и шламов.

Мокрую магнитную сепарацию в сильном поле применяют для обогащения мелких классов крупности мытой руды –2(4) мм и для обогащения доизмельчённых до крупности –2(4) мм промпродуктов отсадки и для обогащения обесшламленных на гидроциклонах и классификаторах сливов промывочных машин. Для этих целей используются валковые сепараторы 4ЭВМ-38/250 (4ЭВМ-40/250) с разным шагом зубцов валка для продуктов крупностью 0,1-1 мм и 0,1-4 мм. Имеется положительный опыт использования высокоградиентных сепараторов для обогащения тонких продуктов крупностью менее 0,1 мм.

Также применяется сухая магнитная сепарация для обогащения промпродуктов гравитационного обогащения.

#### *Магнитное обогащение хромовых (хромитовых) руд*

Полезными минералами хромовых руд являются хромшпинели переменного состава изоморфного ряда магнохромит ( $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Cr}_2\text{O}_4$ ) – хромит ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ).

Хромшпинели относятся к слабомагнитным минералам. Поэтому возможно их магнитное обогащение. Однако на практике в основном используется гравитационное обогащение. Это связано с тем, что породные минералы хромовых руд в основном также представлены слабомагнитными минералами (серпентинами, оливинами и пироксенами).

#### *Магнитное обогащение вольфрамсодержащих руд и россыпей*

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

Схема магнитного обогащения состоит из операций высокоинтенсивной магнитной сепарации узких классов крупности ( $-2+0,5$  мм и  $-0,5+0$  мм) с выделением в магнитный продукт гюбнерита и вольфрамит. Немагнитный продукт поступает на измельчение и флотацию шеелита [61].

При доводке черновых гравитационных концентратов россыпей, содержащих вольфрамит и касситерит, магнитная сепарация в сильном поле применяется для отделения слабомагнитного вольфрамитового концентрата от немагнитного касситеритового (оловянного концентрат) [62].

#### *Магнитная доводка алмазсодержащих промпродуктов*

При обогащении алмазов сухая магнитная сепарация в сильном магнитном поле применяется для удаления в магнитный продукт слабомагнитных минералов из промпродуктов крупностью менее 3 мм. При этом в немагнитной фракции повышается массовая доля алмазов.

#### *Магнитное 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.

В схемах обогащения неметаллических полезных ископаемых применяют 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.

#### *Обезжелезивание кварцевого и полевошпатового сырья*

Цена кварцевых и полевошпатовых концентратов во многом определяется массовой долей железа, являющегося вредной примесью.

На Кыштымском ГОКе (Челябинская обл.) для обезжелезивания кварцевых концентратов и на Малышевском РУ (Свердловская обл.) для обезжелезивания полевошпатового концентрата применяют как валковые сепараторы с электромаг-

нитной системой типа ЭВС, так и шкивные сепараторы с системой из постоянных магнитов (Nd-Fe-B).

На Вишневогорском ГОКе (Челябинская обл.) для обезжелезивания измельчённого полевошпатового сырья перед флотацией применяют барабанные сепараторы с системой из постоянных магнитов (Nd-Fe-B) для удаления аппаратного железа и магнетита. Для обезжелезивания флотационного концентрата используют высокоградиентные сепараторы типа «Slon» (Китай).

*Обезжелезивание исходных и отработанных формовочных песков литейных цехов металлургических заводов*

Магнитная сепарация широко применяется для обезжелезивания формовочных песков, как исходных, так и отработанных для удаления окислов железа и металлического скрапа. Например, в чугунолитейных цехах АвтоВАЗа, КамАЗа и других предприятий отработанные формовочные пески подвергаются многоступенчатой магнитной сепарации с помощью подвесных и барабанных железоотделителей.

#### **5.4. Обогащение вторичного сырья**

Магнитные методы обогащения широко применяют в линиях переработки техногенного сырья [51, 58].

Магнитная сепарация используется в схемах переработки дробленого кабельного лома, бронированного стальной лентой. Дроблёный бронированный кабель состоит из токопроводящих медных или алюминиевых жил, изоляционных материалов (ПВХ, бумага, ткань) и стальной или свинцовой брони. В схеме используется магнитная сепарация для удаления из потока разделяемых продуктов частиц стальной брони. Далее, по схеме, предусмотрены две последовательные операции феррогидростатической сепарации при разной рабочей плотности ферромагнитной жидкости (в первой операции плотность меньше) для последовательного выделения частиц алюминия, меди и свинца. Вместо феррогидростатической сепарации используется и электродинамическая сепарация (рис. 5.17).

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 двухстадиальную се-

парацию подвесными и барабанными (шкивными) железоотделителями, при толщине слоя менее 50 мм применяют подвесные железоотделители.

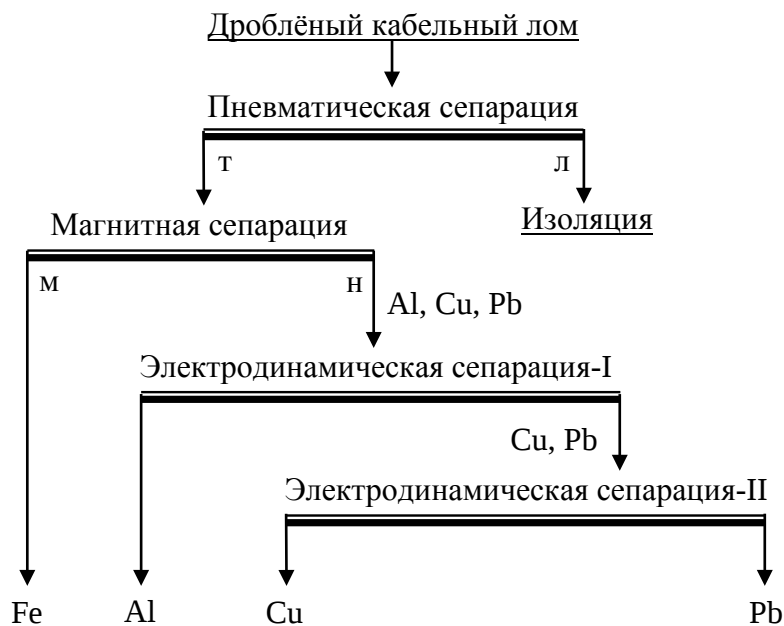


Рис. 5.17. Принципиальная схема обогащения бронированного кабеля

При магнитном обогащении дробленого лома алюминиевых сплавов, состоящего из узлов самолетов, двигателей внутреннего сгорания, 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 железоотделителей, 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.

Магнитная сепарация используется в схемах переработки шлаков алюминия и меди, а также в схемах переработки стружки цветных металлов для обезжелезивания продуктов.

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, имеющих различные магнитные свойства. Разделение предварительно обезжелезенной стружки по магнитным свойствам позволяет получать продукты для выплавки следующих

сплавов: железо-марганцовистые бронзы и латуни (среднемагнитные); марганцовистые бронзы и латуни (слабомагнитные); оловянные бронзы или свинцовые латуни (немагнитные). Предварительное магнитное разделение смешанной стружки на медной основе позволяет разделить стружку на продукты, пригодные непосредственно для выплавки марочных сплавов [31].

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; извлечение слабомагнитных цветных металлов.

В технологических схемах переработки твердых бытовых отходов магнитное обогащение применяется для извлечения кусковых и мелкодробленых ферромагнитных элементов (железный концентрат) и для получения оловосодержащего концентрата (консервные банки). Используют как подвесные сепараторы, так и барабанные или комбинацию обоих (при большом слое материала на транспортерной ленте). Кроме магнитной сепарации в схемах переработки твердых бытовых отходов применяется электродинамическая сепарация для выделения немагнитных металлов (Cu, Al), а также электрическая сепарация для разделения полимерной пленки и бумаги [74].

Магнитное обогащение используется 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 повторной переработке шламов и отходов обогатительных фабрик и металлургических заводов. Известны положительные результаты мокрого магнитного обогащения шламов марганцевых и окисленных железных руд и других продуктов (забалансовых слабомагнитных руд, промпродуктов и шламов). Для этих целей в основном применяют высокоградиентные сепараторы.

## 6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ СХЕМ ОБОГАЩЕНИЯ МАГНЕТИТОВЫХ РУД

Расчёты технологических показателей магнитного обогащения включают расчёт технологического баланса переработки руды, расчёт качественно-количественной и водно-шламовой схемы.

Расчёты выполняются на стадии проектирования предприятия по переработке руды нового месторождения и для действующей обогатительной фабрики при составлении технологического и товарного баланса и составлении качественно-количественной и водно-шламовой схемы.

При выполнении студентом дипломного или курсового проекта (работы) предполагается, что студент проектирует новое предприятие. Исходные данные задаёт преподаватель.

### 6.1. Расчёт технологического баланса переработки руды

При проектировании нового предприятия (на стадиях разработки технико-экономического обоснования инвестиций, технологического регламента, технико-экономического обоснования постоянных разведочных кондиций) исходными данными являются массовые доли полезного компонента в исходной руде и в концентрате и извлечение полезного компонента в концентрат.

Исходные данные принимаются по результатам лабораторных и укрупнённых испытаний проб исследуемой железной или другой руды на обогатимость магнитным методом.

Расчёт показателей технологического баланса рассчитывают в следующей последовательности.

Выход концентрата ( $\gamma_k$ ) рассчитывают по формуле, %:

$$\gamma_k = \epsilon_k \cdot \alpha / \beta, \quad (6.1)$$

где  $\epsilon_k$  – извлечение железа в концентрат, %;  $\alpha$  и  $\beta$  – массовые доли железа соответственно в исходной руде и в концентрате, %.

Выход хвостов ( $\gamma_x$ ) и извлечение железа в хвосты ( $\epsilon_x$ ) определяют по уравнениям материального баланса, %:

$$\gamma_x = 100 - \gamma_k, \text{ \%}; \quad \epsilon_x = 100 - \epsilon_k. \quad (6.2)$$

Массовую долю железа в хвостах ( $\vartheta$ ) рассчитывают по формуле, %:

$$\vartheta = \epsilon_x \cdot \alpha / \gamma_x. \quad (6.3)$$

После расчёта технологических показателей необходимо выполнить проверку по уравнению материального баланса

$$100 \cdot \alpha = \gamma_k \cdot \beta + \gamma_x \cdot \vartheta. \quad (6.4)$$

Численные значения правой и левой частей уравнения должны быть равны.

При выполнении студентом дипломного или курсового проекта (работы) расчёт выполняется по формулам (6.1)-(6.4). Исходные данные задаёт преподаватель.

Для действующей обогатительной фабрики исходными данными для расчёта технологического баланса являются массовые доли железа в исходной руде, концентрате и хвостах, определяемые путём опробования соответствующих продуктов.

Выход концентрата и хвостов рассчитывают по уравнениям:

$$\gamma_k = \frac{\alpha - \vartheta}{\beta - \vartheta} \cdot 100 \%; \quad (6.5)$$

$$\gamma_x = \frac{\beta - \alpha}{\beta - \vartheta} \cdot 100 \%. \quad (6.6)$$

Проверяют, чтобы выполнялось равенство:  $\gamma_k + \gamma_x = 100 \%$ .

Извлечение железа в концентрат и в хвосты рассчитывают по формулам, %:

$$\varepsilon_k = \frac{\gamma_k \cdot \beta}{\alpha}; \quad (6.7)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\gamma_x \cdot \vartheta}{\alpha}. \quad (6.8)$$

Проверяют, чтобы выполнялось равенство:  $\varepsilon_k + \varepsilon_x = 100 \%$ .

### **Пример**

Рассчитать технологический баланс обогатительной фабрики проектируемого ГОКа по добыче и обогащению железистых кварцитов. Проектная производительность ГОКа по сырой руде составляет 12 млн. т/год, влажность руды 2 %.

По данным лабораторных и полупромышленных испытаний установлено, что из руды с массовой долей железа  $\alpha=32 \%$  получается концентрат с массовой долей железа  $\beta=65,8 \%$  при извлечении железа в концентрат  $\varepsilon_k=67,8 \%$ .

### **Решение**

Используя уравнение (6.1), находим выход концентрата:  $\gamma_k=32,97 \%$ . Выход хвостов и извлечение железа в хвосты рассчитываем, используя зависимости (6.2):  $\gamma_x=67,03 \%$  и  $\varepsilon_x=32,2 \%$ . Массовую долю железа в хвостах рассчитываем по уравнению (6.3):  $\vartheta=15,37 \%$ .

После расчёта выполняем проверку правильности полученных технологических показателей по соотношению (6.4) при  $\gamma_n=100\%$ . Численные значения правой и левой частей уравнения (6.4) должны быть равны:  $3200=3200$ .

Результаты расчёта технологического баланса заносим в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Технологический баланс проектируемого ГОКа (по сухой массе)

| Продукт    | Масса, млн.т/год |        | Выход, % | Массовая доля Fe, % | Извлечение Fe, % |
|------------|------------------|--------|----------|---------------------|------------------|
|            | продукта         | железа |          |                     |                  |
| Концентрат | 3,88             | 2,55   | 32,97    | 65,80               | 67,8             |
| Хвосты     | 7,88             | 1,21   | 67,03    | 15,37               | 32,2             |
| Руда       | 11,76            | 3,76   | 100,00   | 32,00               | 100,0            |

При проектировании нового ГОКа выполняется расчёт экономической эффективности добычи и переработки руды. Для расчёта экономических показателей в технологическом балансе указываются массы руды, концентрата и хвостов и массы полезного компонента в руде, концентрате и хвостах (в млн. т/год). При этом приводятся так называемые «сухие» массы (с учётом влажности руды).

*Влажность* руды – это отношение массы воды в руде к массе сырой руды:

$$W = \frac{M_{\text{вр}}}{Q} \cdot 100 \%, \quad (6.9)$$

где  $M_{\text{вр}}$  – масса воды в добытой руде;  $Q$  – масса сырой руды.

Масса сухой руды

$$Q_c = Q \cdot (1 - W/100). \quad (6.10)$$

По уравнению (6.10) рассчитываем массу сухой руды:  $Q_c = 12 \cdot 0,98 = 11,76$  млн. т/год.

Массы (сухие) концентрата и хвостов рассчитываем соответственно путём умножения  $Q_c$  на  $\gamma_k$  и  $\gamma_x$  и деления на сто:  $11,76 \cdot 32,97/100 = 3,88$  млн. т/год;  $11,76 \cdot 67,03/100 = 7,88$  млн.т/год. Проверяем материальный баланс:  $11,76 = 3,88 + 7,88$ .

Массы железа в руде, концентрате и в хвостах рассчитываем путём умножения массовых долей железа в руде, концентрате и в хвостах, соответственно на массы (сухие) руды, концентрата и хвостов:  $32 \cdot 11,76/100 = 3,76$  млн. т/год;  $65,8 \cdot 3,88/100 = 2,55$  млн. т/год;  $15,37 \cdot 7,88/100 = 1,21$  млн. т/год. Проверяем материальный баланс:  $3,76 = 2,55 + 1,21$ .

## 6.2. Расчёт качественно-количественной схемы обогащения

Целью расчета качественно-количественной схемы является определение выходов всех продуктов схемы переработки магнетитовой руды. Исходными данными являются массовые доли железа и класса –71 мкм в продуктах обогащения, измельчения и классификации.

При расчёте качественно-количественной схемы для нового проектируемого предприятия расчёт выполняют снизу вверх от последней к первой опера-

ции схемы. При этом известен выход магнитного продукта (концентрата) последней операции и заданы массовые доли железа во всех продуктах разделения за исключением одного (обычно немагнитного продукта первой операции ММС). При расчёте качественно-количественной схемы для действующего предприятия расчёт выполняют сверху вниз от первой к последней операции схемы. При этом известны массовые доли железа во всех продуктах разделения, выход концентрата рассчитывается.

### 6.2.1. Расчёт операции разделения в двухпродуктовом сепараторе

*Расчёт схемы сверху вниз – от первой к последней операции*

При генеральном опробовании технологической схемы действующего предприятия отбираются пробы питания и продуктов разделения каждой операции. Пробы анализируются на массовую долю полезного компонента. Выходы продуктов рассчитываются. Для одной операции разделения на два продукта (рис. 6.1) справедлива система уравнений

$$\begin{cases} \gamma_1 = \gamma_2 + \gamma_3; \\ \gamma_1 \beta_1 = \gamma_2 \beta_2 + \gamma_3 \beta_3, \end{cases} \quad (6.11)$$

где  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  и  $\gamma_3$  – выходы исходного продукта и продуктов разделения, %;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  и  $\beta_3$  – массовые доли железа в исходном продукте и в продуктах разделения, %.

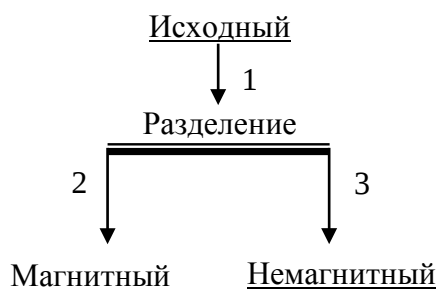


Рис. 6.1. Операция разделения на два продукта

Решая систему уравнений (6.11), можно найти выходы продуктов разделения  $\gamma_2$  и  $\gamma_3$  по известным значениям  $\gamma_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  и  $\beta_3$ :

$$\gamma_2 = \gamma_1 \frac{\beta_1 - \beta_3}{\beta_2 - \beta_3}; \quad \gamma_3 = \gamma_1 \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_2 - \beta_3}. \quad (6.12)$$

Для первой операции выход исходного продукта равен 100 %. Для последующих операций выход исходного продукта равен выходу одного из продуктов разделения предыдущей операции.

*Расчёт схемы снизу вверх – от последней к первой операции*

При расчёте проектируемой схемы известен выход магнитного продукта  $\gamma_2$  последней операции (выход концентрата) и массовые доли полезного компонента во всех продуктах  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  и  $\beta_3$  (см. рис. 6.1). Расчётные формулы выводятся из системы уравнений (6.11)

$$\gamma_3 = \gamma_2 \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_1 - \beta_3}; \quad \gamma_1 = \gamma_2 + \gamma_3. \quad (6.13)$$

Расчёт последующих операций выполняют аналогично.

При расчёте первой операции схемы известны массовые доли полезного компонента в исходном ( $\beta_1$ ) и в магнитном ( $\beta_2$ ) продуктах и два выхода – выход магнитного продукта  $\gamma_2$  и выход исходного продукта  $\gamma_1=100$  % (см. рис. 6.1). Расчётные формулы выводятся из системы уравнений (6.11)

$$\beta_3 = \frac{\gamma_1 \beta_1 - \gamma_2 \beta_2}{\gamma_3}; \quad \gamma_3 = \gamma_1 - \gamma_2. \quad (6.14)$$

При выполнении студентом дипломного или курсового проекта (работы) расчёт выполняется по формулам (6.13), (6.14). Исходные данные задаёт преподаватель.

#### **Пример**

При сухой магнитной сепарации (СМС) мелкодроблённой магнетитовой руды получают промпродукт (магнитный продукт) и хвосты (немагнитный продукт). Рассчитать  $\gamma_2$  и  $\gamma_3$ , если известно:  $\gamma_1=90$  %,  $\beta_1=34$  %,  $\beta_2=40$  % и  $\beta_3=10$  % (см. рис. 6.1).

#### **Решение**

По формулам (6.12) рассчитываем выходы:  $\gamma_2=72$  % и  $\gamma_3=18$  %. Выполняем проверку по первому уравнению системы (6.1):  $72+18=90$  %.

### **6.2.2. Расчёт операции разделения в трёхпродуктовом сепараторе**

В трёхпродуктовых сухих магнитных сепараторах осуществляются две последовательные операции, то есть в одном сепараторе реализуется схема обогащения (рис. 6.2).

При опробовании таких сепараторов отбираются пробы питания и конечных продуктов разделения. Пробы анализируются на массовую долю полезного

компонента. При этом внутренние продукты не опробуются, так как нет технической возможности.

Для процесса разделения в одном сепараторе на три продукта (см. рис. 6.2) справедлива система уравнений

$$\begin{cases} \gamma_1 = \gamma_2 + \gamma_4 + \gamma_5; \\ \gamma_1 \beta_1 = \gamma_2 \beta_2 + \gamma_4 \beta_4 + \gamma_5 \beta_5. \end{cases} \quad (6.15)$$

Для расчёта показателей разделения необходимо знать выходы двух продуктов – исходного ( $\gamma_1=100\%$ ) и одного из трёх конечных. Их определяют по производительности с помощью конвейерных весов. Тогда, используя уравнения материального баланса (6.15), можно рассчитать два других неизвестных выхода. Иногда выходы всех продуктов можно определить по показателям конвейерных весов. Тогда делают проверку на выполнение материального баланса по формулам (6.15).

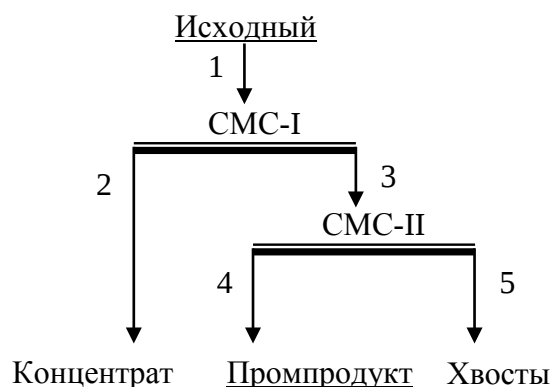


Рис. 6.2. Технологические схемы разделения в трёхпродуктовом сепараторе

### Пример

При сухой магнитной сепарации мелкодроблённой магнетитовой руды (после III стадии дробления) на трёхпродуктовом магнитном сепараторе получают аглоруду (концентрат), промпродукт и хвосты (см. рис. 6.2). Известно, что производительность исходного продукта  $Q_1=360$  т/ч и  $\gamma_1=100\%$ . Если в схеме рудоподготовки дополнительно предусмотрена сухая магнитная сепарация после I или II стадии дробления, то  $\gamma_1 < 100\%$ .

Производительность по аглоруде  $Q_2=36$  т/ч. По результатам опробования известно, что массовая доля железа в питании и в конечных продуктах разделения:  $\beta_1=35\%$ ,  $\beta_2=50\%$ ,  $\beta_4=36\%$  и  $\beta_5=10\%$ .

Рассчитать  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$ ,  $\gamma_4$ ,  $\gamma_5$ ,  $\beta_3$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_4$  и  $\varepsilon_5$ .

### Решение

Рассчитываем  $\gamma_2=100 \cdot Q_2/Q_1=10\%$ .

Используя первое уравнение системы (6.15), выводим формулу для расчёта  $\gamma_4$ :

$$\gamma_4 = \gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_5. \quad (6.16)$$

Во второе уравнение системы (6.15) подставляем уравнение (6.16) и выводим формулу для расчёта  $\gamma_5$  и рассчитываем выход  $\gamma_5=9,23$  %. По уравнению (6.16) рассчитываем выход:  $\gamma_4=80,77$  %.

Выход  $\gamma_3$  рассчитываем по двум формулам:

$$\gamma_3=\gamma_4+\gamma_5 \text{ или } \gamma_3=\gamma_1-\gamma_2; \quad (6.17)$$

$$\gamma_3=90 \text{ \%}.$$

Массовую долю железа  $\beta_3$  также рассчитываем по двум формулам;

$$\beta_3=(\gamma_4\cdot\beta_4+\gamma_5\cdot\beta_5)/\gamma_3 \text{ или } \beta_3=(\gamma_1\cdot\beta_1-\gamma_2\cdot\beta_2)/\gamma_3, \quad (6.18)$$

$$\beta_3=33,33 \text{ \%}.$$

Для конечных продуктов рассчитываем извлечения  $\varepsilon_1=100$  %,  $\varepsilon_2=14,28$  %,  $\varepsilon_4=83,08$  и  $\varepsilon_5=2,64$  % по общей формуле

$$\varepsilon_i=\gamma_i\cdot\beta_i/\beta_1, \quad (6.19)$$

где  $i$  – номер продукта.

Сумма  $\varepsilon_2+\varepsilon_4+\varepsilon_5$  должна равняться  $\varepsilon_1=100$  %. Выполняем эту проверку:  $\varepsilon_2+\varepsilon_4+\varepsilon_5=\varepsilon_1=100$  %.

### 6.2.3. Расчёт замкнутых циклов измельчения

Расчет операций магнитного обогащения выполняют по массовой доле железа, а операций стадий измельчения – по массовой доле класса –71 мкм.

#### *Замкнутый цикл измельчения с поверочной классификацией*

Исходные данные для расчета замкнутого цикла измельчения с поверочной классификацией (рис. 6.3):  $\beta_1^{-71}$ ,  $\beta_2^{-71}$ ,  $\beta_3^{-71}$ ,  $\beta_4^{-71}$ ,  $\gamma_1=\gamma_3$ , где  $\beta_j^{-71}$  – массовая доля класса –71 мкм в  $j$ -м продукте, %. Необходимо определить  $\beta_5^{-71}$  и выходы продуктов  $\gamma_2$ ,  $\gamma_4$  и  $\gamma_5$ .

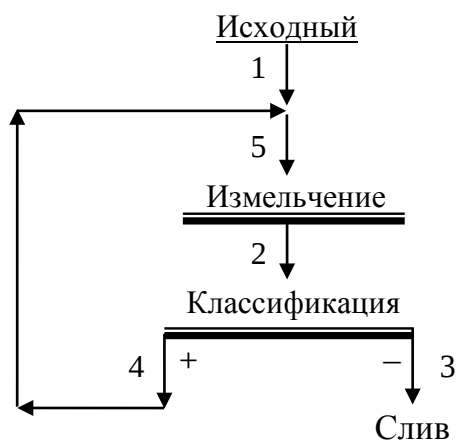


Рис. 6.3. Замкнутый цикл измельчения с поверочной классификацией

Для замкнутого цикла измельчения с поверочной классификацией справедлива система уравнений

$$\begin{cases} \gamma_2 = \gamma_3 + \gamma_4; \\ \gamma_2 \beta_2^{-71} = \gamma_3 \beta_3^{-71} + \gamma_4 \beta_4^{-71}, \end{cases} \quad (6.20)$$

Решая систему уравнений (6.20), получим расчетные формулы:

$$\gamma_4 = \gamma_3 \frac{\beta_3^{-71} - \beta_2^{-71}}{\beta_2^{-71} - \beta_4^{-71}}; \quad \gamma_2 = \gamma_5 = \gamma_3 + \gamma_4. \quad (6.21)$$

Вычислим величину  $\beta_5^{-71}$ :

$$\beta_5^{-71} = \frac{\gamma_1 \beta_1^{-71} - \gamma_4 \beta_4^{-71}}{\gamma_5}. \quad (6.22)$$

*Замкнутый цикл измельчения с совмещённой предварительной и поверочной классификацией*

Исходные данные для расчета (рис. 6.4):  $\beta_1^{-71}$ ,  $\beta_2^{-71}$ ,  $\beta_3^{-71}$ ,  $\beta_4^{-71}$ ,  $\gamma_1 = \gamma_2$ .

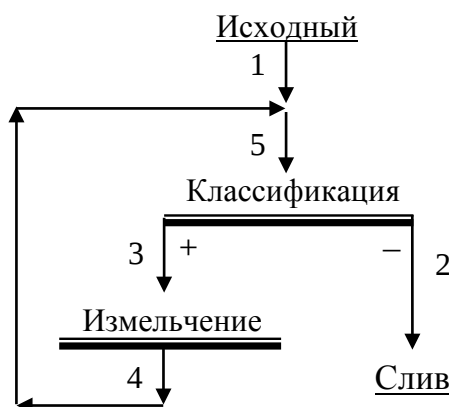


Рис. 6.4. Замкнутый цикл измельчения с совмещённой предварительной и поверочной классификацией

Запишем соотношение:

$$\gamma_1 \beta_1^{-71} + \gamma_4 \beta_4^{-71} = \gamma_2 \beta_2^{-71} + \gamma_3 \beta_3^{-71}. \quad (6.23)$$

Учитывая, что  $\gamma_1 = \gamma_2$  и  $\gamma_3 = \gamma_4$ , получим:

$$\gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_1 \frac{(\beta_2^{-71} - \beta_1^{-71})}{(\beta_4^{-71} - \beta_3^{-71})}. \quad (6.24)$$

Уравнения для величин  $\gamma_5$  и  $\beta_5^{-71}$  следующие:

$$\gamma_5 = \gamma_1 + \gamma_4 = \gamma_2 + \gamma_3; \quad (6.25)$$

$$\beta_5^{-71} = \frac{\gamma_1 \beta_1^{-71} + \gamma_4 \beta_4^{-71}}{\gamma_5} = \frac{\gamma_2 \beta_2^{-71} + \gamma_3 \beta_3^{-71}}{\gamma_5}. \quad (6.26)$$

Величину  $\beta_5^{-71}$  необходимо рассчитать по обеим формулам и сопоставить результаты.

*Замкнутый цикл измельчения, включающий операцию магнитной сепарации*

В схемах измельчения и обогащения железных руд часто во второй стадии измельчения в замкнутом цикле используют обогатительную операцию между мельницей и гидроциклонами (рис. 6.5). Использование мокрой магнитной сепарации (ММС) внутри замкнутого цикла позволяет снизить циркулирующую нагрузку за счёт вывода отвальных хвостов. Это приводит к повышению производительности мельницы и замкнутого цикла в целом.

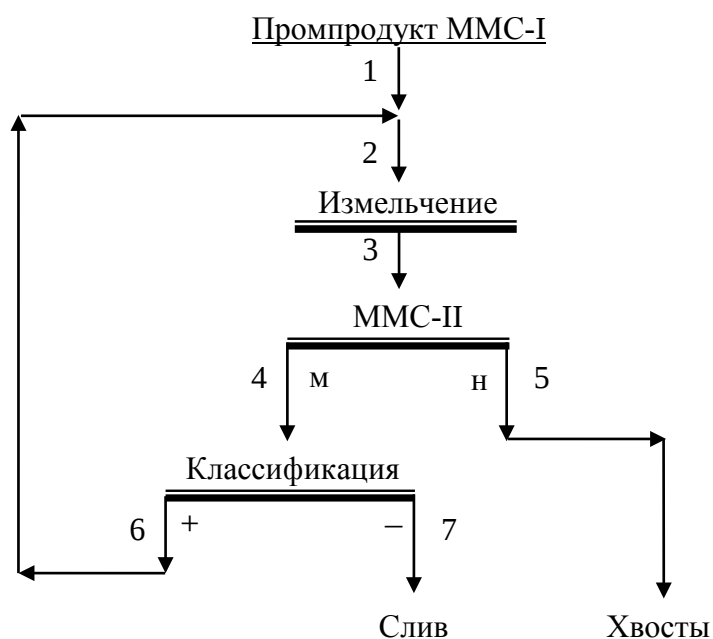


Рис. 6.5. Замкнутый цикл измельчения железной руды с обогатительной операцией

При опробовании таких замкнутых циклов измельчения отбираются пробы всех продуктов. Пробы анализируются на массовую долю железа и класса  $-71$  ( $-44$  мкм). Выходы продуктов рассчитываются (при известном выходе продукта № 1). Расчёт замкнутого цикла измельчения с обогатительной операцией выполняется по массовым долям железа и расчётного класса крупности, например класса  $-71$  мкм.

Замкнутый цикл измельчения (см. рис. 6.5) можно рассмотреть, как одну операцию разделения по железу. Тогда, при известных значениях  $\gamma_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_5$  и  $\beta_7$ , будут справедливы уравнения:

$$\gamma_7 = \gamma_1 \frac{\beta_1 - \beta_5}{\beta_7 - \beta_5}; \quad \gamma_5 = \gamma_1 \frac{\beta_7 - \beta_1}{\beta_7 - \beta_5}. \quad (6.27)$$

После расчёта выполняется проверка:  $\gamma_1 = \gamma_7 + \gamma_5$ .

Операцию классификации рассчитывают по массовой доле расчётного класса -71 мкм (необходимо знать  $\beta^{-71}$  в питании, сливе и песках гидроциклонов). Сначала принимают выход продукта № 4 равным 100 % и рассчитывают частные выходы продуктов № 5 и 7 (выходы к операции классификации) по формулам:

$$\gamma'_7 = \gamma'_4 \frac{\beta_4^{-71} - \beta_6^{-71}}{\beta_7^{-71} - \beta_6^{-71}}; \quad \gamma'_6 = \gamma'_4 \frac{\beta_7^{-71} - \beta_4^{-71}}{\beta_7^{-71} - \beta_6^{-71}}, \quad (6.28)$$

где  $\gamma'_i$  – частный выход  $i$ -го продукта (выход к операции классификации), %.

После расчёта выполняется проверка:  $\gamma'_7 + \gamma'_6 = 100$  %.

Далее рассчитывают выходы продуктов № 4 и 6:

$$\gamma_4 = 100 \cdot \gamma_7 / \gamma'_7; \quad \gamma_6 = \gamma'_6 \cdot \gamma_4 / 100. \quad (6.29)$$

После расчёта выполняется проверка:  $\gamma_7 = \gamma_4 - \gamma_6$ .

Выходы второго и третьего продуктов можно рассчитать по двум формулам:

$$\gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_1 + \gamma_6 = \gamma_4 + \gamma_5. \quad (6.30)$$

Расчёт  $\gamma_2 = \gamma_3$  выполняется по обеим формулам, результаты должны быть равны.

Для расчёта массовых долей железа в шестом, втором и третьем продуктах необходимо знать массовую долю железа в четвёртом продукте:

$$\beta_6 = \frac{\gamma_4 \beta_4 - \gamma_7 \beta_7}{\gamma_4 - \gamma_7}; \quad (6.31)$$

$$\beta_2 = \beta_3 = \frac{\gamma_1 \beta_1 + \gamma_6 \beta_6}{\gamma_1 + \gamma_6} = \frac{\gamma_4 \beta_4 + \gamma_5 \beta_5}{\gamma_4 + \gamma_5}; \quad (6.32)$$

Расчёт  $\beta_2 = \beta_3$  выполняется по формуле (6.32), результаты должны быть равны.

Для расчёта массовых долей класса -71 мкм во втором и пятом продуктах необходимо знать массовую долю класса -71 мкм в первом и третьем продуктах:

$$\beta_2^{-71} = \frac{\gamma_1 \cdot \beta_1^{-71} + \gamma_6 \cdot \beta_6^{-71}}{\gamma_1 + \gamma_6}; \quad \beta_5^{-71} = \frac{\gamma_3 \cdot \beta_3^{-71} - \gamma_4 \cdot \beta_4^{-71}}{\gamma_3 - \gamma_4}. \quad (6.33)$$

Для каждого цикла измельчения рассчитывают циркулирующую нагрузку по формуле:

$$C = \frac{\gamma_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{исх}}} \cdot 100, \% \quad (6.34)$$

где  $\gamma_{\text{ц}}$  и  $\gamma_{\text{исх}}$  – выходы циркулирующего и исходного продуктов (4-го и 1-го продуктов (см. рис. 6.3, 6.4) и 6-го и 1-го (см. рис. 6.5)).

Заканчивают расчёт замкнутого цикла измельчения определением показателей работы мельниц и классификаторов (спиральных классификаторов или гидроциклонов).

Производительность мельницы (мельниц) по твёрдому, т/ч:

$$Q_{\text{м}} = Q_1 \cdot (1 + C/100), \quad (6.35)$$

где  $Q_1$  – исходная производительность замкнутого цикла (продукта № 1), т/ч.

Удельная производительность мельницы (мельниц) по классу –71 мкм:

$$q^{-71} = Q_{\text{м}} \frac{\beta_3^{-71} - \beta_2^{-71}}{100 \cdot V}, \quad (6.36)$$

где  $q^{-71}$  – удельная производительность мельниц (на единицу её объёма) по классу –71 мкм, т/(ч·м<sup>3</sup>);  $V$  – суммарный рабочий объём мельниц, м<sup>3</sup>.

Эффективность классификации по классу –71 мкм, %:

$$E_{\text{кл}} = \varepsilon_{\text{сл}}^{-71} - \varepsilon_{\text{сл}}^{+71} = 10000 \frac{(\alpha^{-71} - \vartheta^{-71}) \cdot (\beta^{-71} - \alpha^{-71})}{\alpha^{-71} \cdot (\beta^{-71} - \vartheta^{-71}) \cdot (100 - \alpha^{-71})}, \quad (6.37)$$

где  $\varepsilon_{\text{сл}}^{-71}$  и  $\varepsilon_{\text{сл}}^{+71}$  – извлечение классов –71 и +71 мкм в слив гидроциклонов, %;  $\alpha^{-71}$ ,  $\vartheta^{-71}$  и  $\beta^{-71}$  – массовые доли класса –71 мкм, соответственно в питании, песках и в сливе гидроциклонов, %.

### **Пример**

Вторая стадия измельчения и обогащения титаномагнетитовой руды осуществляется в замкнутом цикле измельчения, приведённом на рис. 6.5.

По результатам опробования известны массовые доли железа и класса –71 мкм в продуктах:  $\beta_1=28,1$  %;  $\beta_4=50$  %;  $\beta_5=5,8$  %;  $\beta_7=49,3$  % и  $\beta_1^{-71}=12,4$  %;  $\beta_3^{-71}=34,8$  %;  $\beta_4^{-71}=32,8$  %;  $\beta_6^{-71}=21,4$  %;  $\beta_7^{-71}=72$  %.

Исходная производительность замкнутого цикла  $Q_1=104$  т/ч. Выход питания замкнутого цикла от руды  $\gamma_1=42,14$  %. В замкнутом цикле используется мельница МШЦ-3600х5500 с объёмом  $V=48$  м<sup>3</sup>.

Рассчитать  $\gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6, \gamma_7, \beta_2, \beta_3, \beta_6, \beta_2^{-71}; \beta_5^{-71}, C, Q_m, q^{-71}$  и  $E_{кл}$ .

#### Решение

По формулам (6.27) рассчитываем выходы:  $\gamma_7=21,6$  % и  $\gamma_5=20,54$  %.

По формулам (6.28) рассчитываем частные выходы:  $\gamma'_7=22,53$  % и  $\gamma'_6=77,47$  %. Выполняем проверку:  $22,53+77,47=100$  %.

По формулам (6.29) рассчитываем выходы:  $\gamma_4=95,88$  % и  $\gamma_6=74,28$  %. Выполняем проверку:  $21,6=95,88-74,28$ .

По обеим формулам (6.30) находим выходы:  $\gamma_2=\gamma_3=116,42=116,42$  %. Результаты одинаковые.

По формулам (6.31) и (6.32) находим массовые доли железа:  $\beta_6=50,2$  % и  $\beta_2=\beta_3=42,2$  %. Расчёт  $\beta_2=\beta_3$  выполняем по обеим формулам (6.32), результаты:  $42,2$  %=42,2 %.

По формулам (6.33) рассчитываем массовые доли:  $\beta_2^{-71}=18,14$  % и  $\beta_5^{-71}=44,14$  %.

По формуле (6.34) рассчитываем циркулирующую нагрузку:  $C=176,3$  %.

По формулам (6.35) и (6.36) рассчитываем производительность мельницы по твёрдому (по питанию) и удельную производительность и по классу -71 мкм:  $Q_m=287,33$  т/ч и  $q^{-71}=1,0$  т/(ч·м<sup>3</sup>). По формуле (6.37) рассчитываем эффективность классификации по классу -71 мкм:  $E_{кл}=40,07$  %.

#### 6.2.4. Составление качественно-количественной схемы

При расчёте качественно-количественной схемы всем продуктам присваивается номер. Нумерация всех продуктов осуществляется сверху вниз (рис. 6.6).

Расчёт ведут по формулам (6.11) – (6.33).

После нахождения выходов всех продуктов выполняют проверку «по хвостам». Для схемы, приведённой на рис. 6.6, проверка выполняется по соотношениям:

$$\gamma_{18} = \gamma_3 + \gamma_9 + \gamma_{15} + \gamma_{17}; \quad (6.38)$$

$$\gamma_{18} \beta_{18} = \gamma_3 \beta_3 + \gamma_9 \beta_9 + \gamma_{15} \beta_{15} + \gamma_{17} \beta_{17}. \quad (6.39)$$

Правые и левые части соотношений (6.38) и (6.39) должны быть равными.

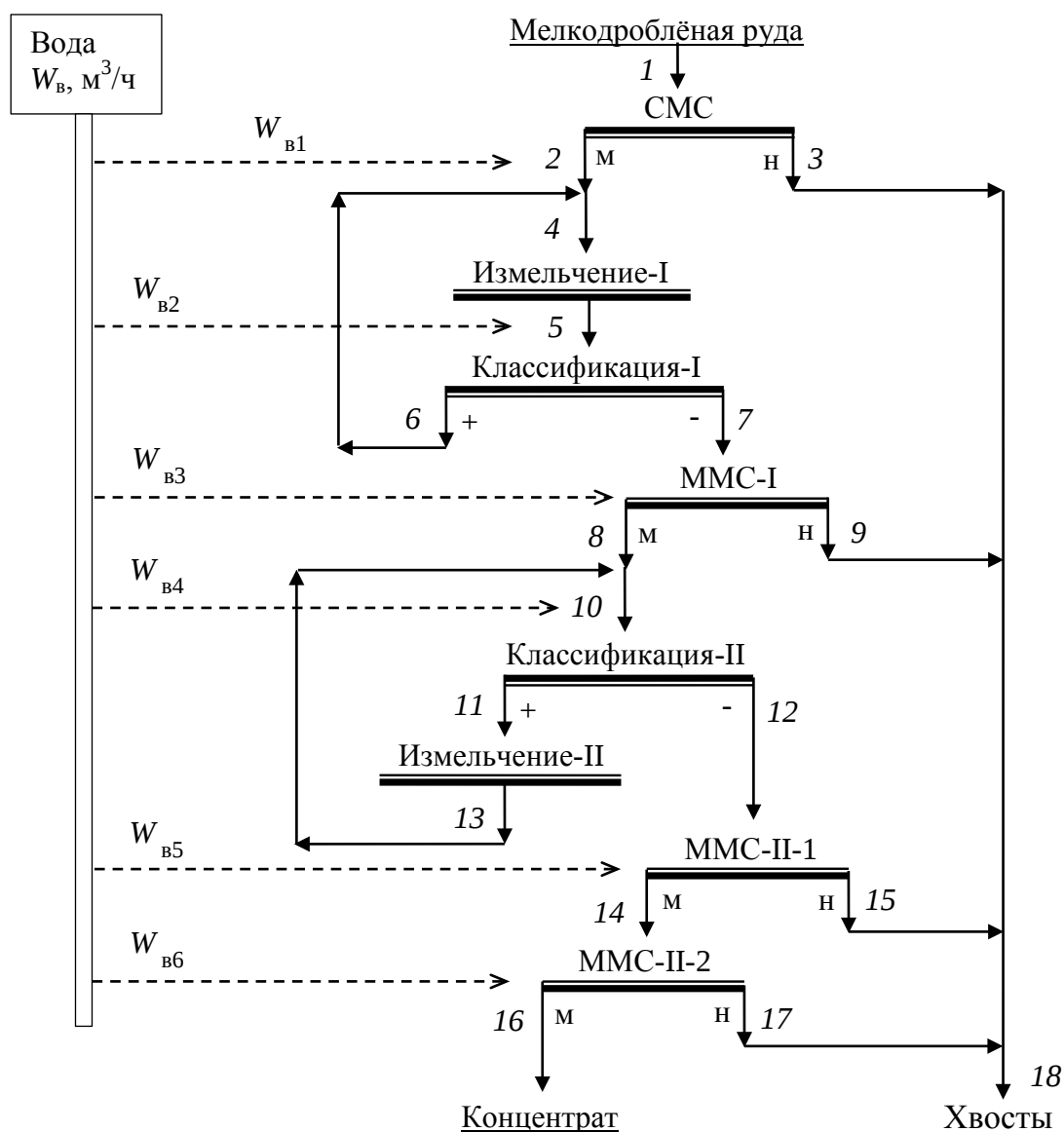


Рис. 6.6. Схема обогащения магнетитовой руды с нумерацией продуктов и с изображением подачи технологической воды в операции:  
« -----> » – подача технологической воды

Для исходного, магнитного и немагнитного продуктов операций магнитной сепарации рассчитывается извлечение железа в эти продукты, %:

$$\varepsilon_j = \frac{\gamma_j \cdot \beta_j}{\alpha}, \quad (6.40)$$

где  $j$  – номер продукта.

Результаты расчётов заносятся в таблицу. Пример таблицы (для первых двух операций схемы) приведён в табл. 6.2.

Таблица 6.2

## Результаты расчета качественно-количественной схемы

| Поступает                      |             |                     |                 |                    | Выходит                          |             |                     |                 |                    |
|--------------------------------|-------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------------------------------|-------------|---------------------|-----------------|--------------------|
| наименование про-<br>дуктов    | выход,<br>% | массовая доля,<br>% |                 | извлече-<br>ние, % | наимено-<br>вание про-<br>дуктов | выход,<br>% | массовая доля,<br>% |                 | извлече-<br>ние, % |
|                                |             | железа              | кл. –71<br>мкм  |                    |                                  |             | железа              | кл. –71<br>мкм  |                    |
| Сухая магнитная сепарация      |             |                     |                 |                    |                                  |             |                     |                 |                    |
| 1. Исход-<br>ная руда          | 100         | $\beta_1$           | -               | 100                | 2. Магнит-<br>ный                | $\gamma_2$  | $\beta_2$           | $\beta_2^{-71}$ | $\varepsilon_2$    |
|                                |             |                     |                 |                    | 3. Немаг-<br>нитный              | $\gamma_3$  | $\beta_3$           | -               | $\varepsilon_3$    |
| 1. Всего:                      | 100         | $\beta_1$           | -               | 100                | 1. Всего:                        | 100         | $\beta_1$           | -               | 100                |
| Измельчение I                  |             |                     |                 |                    |                                  |             |                     |                 |                    |
| 2. Магнит-<br>ный СМС          | $\gamma_2$  | $\beta_2$           | $\beta_2^{-71}$ | $\varepsilon_2$    | 5. Измель-<br>ченный             | $\gamma_5$  | -                   | $\beta_5^{-71}$ | -                  |
| 6. Пески<br>классифи-<br>кации | $\gamma_6$  | -                   | $\beta_6^{-71}$ | -                  |                                  |             |                     |                 |                    |
| 4. Всего:                      | $\gamma_4$  | -                   | $\beta_4^{-71}$ | -                  | 5. Всего:                        | $\gamma_5$  | -                   | $\beta_5^{-71}$ | -                  |

В таблице с результатами расчёта качественно-количественной схемы приводятся все операции технологической схемы (от первой к последней).

### 6.3. Расчёт водно-шламовой схемы

Расчет водно-шламовой схемы и составление баланса по воде выполняют для определения количества воды, подаваемой в операции; определения массовой доли твёрдого в пульпе и её объема; для нахождения общей потребности воды для обогащения руды.

Исходными данными для расчетов являются производительность по твердому и массовая доля твердого в продуктах схемы. Производительность по твердому  $j$ -й операции, т/ч:

$$Q_j = \gamma_j \cdot Q_{\text{исх.}} / 100, \quad (6.41)$$

где  $Q_{\text{исх}}$  – исходная производительность фабрики, т/ч.

Для действующего предприятия массовая доля твёрдого в продуктах определяется экспериментально. Для проектируемого предприятия массовая доля твёрдого задаётся исходя из практики работы предприятий-аналогов.

Перед расчётом определяют операции схемы, в которые подаётся вода. Вода подаётся в первую операцию измельчения, в операции классификации и в операции мокрой магнитной сепарации. Во все операции мокрой магнитной се-

парации вода подаётся для смыва магнитного продукта. В некоторые операции мокрой магнитной сепарации вода подаётся для разбавления исходной пульпы, например в пересистные операции или если питанием сепараторов является слив мельницы. Кроме этого, дополнительная вода подаётся в ванну полупротивоточных сепараторов для повышения качества концентрата.

На схеме подача воды обозначается горизонтальными пунктирными линиями, условно выходящими из общего трубопровода (см. рис. 6.6).

Для расчетов используются соотношения:

$$\beta_{\text{ж}} = 100 - \beta_{\text{тв}}, \%, \quad (6.42)$$

$$W_{\text{в}} = Q \cdot \frac{\beta_{\text{ж}}}{\beta_{\text{тв}}}, \text{ м}^3/\text{ч}; \quad (6.43)$$

$$L = Q + W_{\text{в}}, \text{ т/ч}; \quad (6.44)$$

$$\beta_{\text{ж}} = \frac{W_{\text{в}}}{L} \cdot 100, \%; \quad \beta_{\text{тв}} = \frac{Q}{L} \cdot 100, \%, \quad (6.45)$$

где  $\beta_{\text{ж}}$ ,  $\beta_{\text{тв}}$  – массовые доли жидкого и твердого в продукте, %;  $Q$ ,  $W_{\text{в}}$ ,  $L$  – масса твердого, масса или объем жидкого и общая масса продукта, т/ч, м<sup>3</sup>/ч, т/ч соответственно.

Расчет водно-шламовой схемы начинают с «головы» процесса, от операции измельчения I к последней операции. Сухая магнитная сепарация не рассчитывается.

Результаты оформляют в виде таблицы (табл. 6.3).

Порядок расчета следующий:

1. В таблицу заносят известные значения  $\beta_{\text{тв}}$  (в табл. 6.3 эти значения выделены цветом).
2. По формуле (6.41) рассчитывают величины  $Q_j$ .
3. По формуле (6.42) вычисляют величины  $\beta_{\text{ж}}$ .
4. Используя выражение (6.43), вычисляют величины  $W_{\text{в}i}$ .
5. Определяют суммарные массы продуктов и их составляющих (формула 6.44).
6. Если величина  $\beta_{\text{тв}}$  не задана, то её и  $\beta_{\text{ж}}$  рассчитывают по формулам (6.45). В табл. 6.3 такие вычисления выполнены для питания операции классификации и операции ММС-I.
7. Рассчитывают объем (массу) добавляемой воды в операции схемы для поддержания требуемой массовой доли воды в питании этих операций (измельчение и классификация в табл. 6.3). Используют данные столбца «жидкое, м<sup>3</sup>/ч»

из левой части таблицы (поступает). Из значения объёма воды «всего» вычитают известные значения объёмов воды, поступающих с продуктами в рассматриваемую операцию схемы. Необходимое количество добавляемой воды в операции измельчения и классификации рассчитано, соответственно:  $W_{в1}=309,4-3,3-192,5=113,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $W_{в2}=828,9-309,4=519,5 \text{ м}^3/\text{ч}$  и  $W_{в3}=767,0-636,4=130,6 \text{ м}^3/\text{ч}$  (см. табл. 6.3).

Таблица 6.3

Результаты расчета водно-шламовой схемы

| Поступает                                 |         |       |        |                   |               | Выходит                                   |         |       |        |                   |               |
|-------------------------------------------|---------|-------|--------|-------------------|---------------|-------------------------------------------|---------|-------|--------|-------------------|---------------|
| номер и<br>наимено-<br>вание<br>продуктов | твердое |       | жидкое |                   | всего,<br>т/ч | номер и<br>наимено-<br>вание<br>продуктов | твердое |       | жидкое |                   | всего,<br>т/ч |
|                                           | %       | т/ч   | %      | м <sup>3</sup> /ч |               |                                           | %       | т/ч   | %      | м <sup>3</sup> /ч |               |
| Измельчение-I                             |         |       |        |                   |               |                                           |         |       |        |                   |               |
| 2. Магнит-<br>ный СМС                     | 98,8    | 272,7 | 1,2    | 3,3               | 276,0         | 5. Измель-<br>ченный                      | 70,0    | 721,9 | 30     | 309,4             | 1031,3        |
| 6. Пески<br>классифи-<br>кации            | 70,0    | 449,2 | 30,0   | 192,5             | 641,7         |                                           |         |       |        |                   |               |
| Вода                                      | -       | -     | 100    | 113,6             | 113,6         |                                           |         |       |        |                   |               |
| 4. Всего:                                 | 70,0    | 721,9 | 30     | 309,4             | 1031,3        | 5. Всего:                                 | 70,0    | 721,9 | 30     | 309,4             | 1031,3        |
| Классификация-I                           |         |       |        |                   |               |                                           |         |       |        |                   |               |
| 5. Измель-<br>ченный                      | 70,0    | 721,9 | 30     | 309,4             | 1031,3        | 7. Слив                                   | 30,0    | 272,7 | 70     | 636,4             | 909,1         |
| Вода                                      | -       | -     | 100    | 519,5             | 519,5         | 6. Пески                                  | 70,0    | 449,2 | 30,0   | 192,5             | 641,7         |
| 5. Всего:                                 | 46,6    | 721,9 | 53,4   | 828,9             | 1550,8        | 5. Всего:                                 | 46,6    | 721,9 | 53,4   | 828,9             | 1550,8        |
| ММС-I                                     |         |       |        |                   |               |                                           |         |       |        |                   |               |
| 7. Слив                                   | 30,0    | 272,7 | 70     | 636,4             | 909,1         | 8. Маг-<br>нитный                         | 53,0    | 152,4 | 47     | 135,1             | 287,5         |
| Вода                                      | -       | -     | 100    | 130,6             | 130,6         | 9. Немаг-<br>нитный                       | 16,0    | 120,3 | 84     | 631,9             | 752,2         |
| 7. Всего:                                 | 26,2    | 272,7 | 73,8   | 767,0             | 1039,7        | 7. Всего:                                 | 26,2    | 272,7 | 73,8   | 767,0             | 1039,7        |

и так далее по всей схеме.

Рассчитанные значения добавляемой воды в операции схемы приводят над пунктирными линиями, обозначающими подачу воды (см. рис. 6.6).

После расчёта водно-шламовой схемы составляется баланс по воде. Суммарное количество воды, поступающее в процесс, должно равняться суммарному количеству воды, уходящему из процесса с конечными продуктами.

Баланс по воде для схемы, приведённой на рис. 6.6, представлен в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Баланс воды по фабрике, м<sup>3</sup>/ч

| Поступает в операцию                   | м <sup>3</sup> /ч | Выходит с продуктом    | м <sup>3</sup> /ч |
|----------------------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| 1. В измельчение I с промпродуктом СМС | $W_{вр}$          | 1. Хвосты ММС-I        | $W_{в7}$          |
| 2. В измельчение I                     | $W_{в1}$          | 2. Хвосты ММС-II-1     | $W_{в8}$          |
| 3. В классификацию I                   | $W_{в2}$          | 3. Хвосты ММС-II-2     | $W_{в9}$          |
| 4. В ММС-I                             | $W_{в3}$          | 4. Концентрат ММС-II-2 | $W_{в10}$         |
| 5. В классификацию II                  | $W_{в4}$          |                        |                   |
| 6. В ММС-II-1                          | $W_{в5}$          |                        |                   |
| 7. В ММС-II-2                          | $W_{в6}$          |                        |                   |
| Всего:                                 | $\Sigma W_{вi}$   | Всего:                 | $\Sigma W_{вi}$   |

В левую часть табл. 6.4 (поступает) записывают значения объёма добавляемой в операции схемы воды ( $W_{в1} \dots W_{в6}$ ). В первой строке левой части таблицы приводят объём воды  $W_{вр}$ , поступающей в схему вместе в рудой или промпродуктом СМС (естественная влажность). В правой части табл. 6.4 приводят объёмы воды, выходящей из схемы с конечными продуктами (концентратом и хвостами). Например,  $W_{в7}=631,9$  м<sup>3</sup>/ч (величина  $W_{в7}$  берётся из столбца «жидкое, м<sup>3</sup>/ч», из правой части табл. 6.3 (выходит)).

Определяют общий расход воды:  $W_{в}=\Sigma W_{вi} - W_{вр}$ . Величину общего расхода воды записывают в прямоугольнике, условно обозначающем ёмкость с водой (см. левую верхнюю часть рис. 6.6).

Далее находят удельный расход воды на одну тонну обогащаемой руды и на одну тонну концентрата:

$$q_{вр} = W_{в} / Q_{исх}; \quad q_{вк} = W_{в} / Q_{к}, \quad (6.46)$$

где  $Q_{исх}$  и  $Q_{к}$  – производительность по руде и по концентрату, т/ч.

Обычно  $q_{вр}$  находится в пределах 3-8 м<sup>3</sup>/т. Значение  $q_{вк}$ , как правило, выше 10 м<sup>3</sup>/т.

#### 6.4. Совмещённая качественно-количественная и водно-шламовая схема

На практике результаты расчёта качественно-количественной и водно-шламовой схем чаще оформляются не в виде отдельных таблиц (см. табл. 6.2 и 6.3) и отдельных схем, а в виде схемы обогащения с указанием всех расчётных показателей для каждого продукта и с указанием общего требуемого объёма воды и объёма воды, подаваемого в операции схемы. Такая схема называется совмещённой качественно-количественной и водно-шламовой схемой (пример

приведён на рис. 6.7). На схеме дополнительно указывается массовая доля железа магнетитового ( $\beta_m$ ) в исходной руде и в немагнитных продуктах (хвостах). Схема в основном оформляется на листе формата А4.

Значения показателей для каждого продукта в основном записывают в прямоугольниках, разделённых на отдельные ячейки (в виде таблиц). В верхней части схемы приводят отдельную таблицу с указанием в ячейках буквенных обозначений показателей с единицами измерения.

На совмещённой качественно-количественной и водно-шламовой схеме действующих обогатительных фабрик часто указываются дополнительные показатели, например циркулирующая нагрузка в замкнутых циклах измельчения, удельные производительности мельниц, эффективность классификации, объём пульпы, подаваемой в гидроциклоны, и др.

При проектировании нового предприятия совмещённая качественно-количественная и водно-шламовая схема оформляется на листе формата А1 и входит в графическую часть раздела «Технологические решения» проекта на строительство промышленного объекта (обогатительной фабрики). В этом случае в нижней части листа дополнительно приводится технологический баланс и баланс по воде.

### **Пример**

Рассчитать качественно-количественную и водно-шламовую схему проектируемого предприятия по обогащению магнетитовой руды. Результаты расчёта представить в виде совмещённой качественно-количественной и водно-шламовой схемы. Схема обогащения руды приведена на рис. 6.6.

Исходные данные для расчёта технологического баланса – массовые доли железа в исходной руде и в концентрате и извлечение полезного компонента в концентрат.

Исходная производительность обогатительной фабрики (технологической секции) равна 321,7 т/ч. Влажность руды 1,2 %.

Исходные данные для расчёта качественно-количественной схемы – массовые доли железа и класса –71 мкм в продуктах обогащения, измельчения и классификации. Исходные данные для расчёта водно-шламовой схемы – массовая доля твёрдого в продуктах схемы.

Для замкнутых циклов измельчения рассчитать циркулирующую нагрузку, удельную производительность мельниц и по классу –71 мкм, эффективность классификации в гидроциклонах и объём пульпы, подаваемой в гидроциклоны.

### **Решение**

Технологический баланс рассчитывается по формулам (6.1)-(6.4). Технологический баланс приводится в таблице (табл. 6.5)

Качественно-количественная схема рассчитывается снизу вверх. При расчёте операций магнитной сепарации используются формулы (6.13)-(6.14). Расчёт замкнутых циклов измельчения осуществляется по формулам (6.20)-(6.37). Проверка расчёта «по хвостам»

осуществляется по формулам (6.38)-(6.39). Извлечение железа рассчитывается по формуле (6.40) для питания, магнитного и немагнитного продуктов операций магнитной сепарации.

Таблица 6.5

Технологический баланс обогащения магнетитовой руды

| Продукт    | Выход, % | Массовая доля Fe, % | Извлечение Fe, % |
|------------|----------|---------------------|------------------|
| Концентрат | 38,9     | 65,90               | 76,3             |
| Хвосты     | 61,1     | 13,04               | 23,7             |
| Руда       | 100,0    | 33,60               | 100,0            |

Водно-шламовая схема рассчитывается по формулам (6.41)-(6.46). Баланс воды по фабрике приводится в таблице (табл. 6.6).

Удельные расходы воды на одну тонну обогащаемой руды и на одну тонну концентрата рассчитывают по формулам (6.46).

Таблица 6.6

Баланс воды по фабрике

| Поступает в операцию                   | м <sup>3</sup> /ч | Выходит с продуктом       | м <sup>3</sup> /ч |
|----------------------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|
| 1. В измельчение I с промпродуктом СМС | 3,3               | 1. Хвосты ММС-I           | 631,8             |
| 2. В измельчение I                     | 113,6             | 2. Хвосты ММС-II-1 и II-2 | 493,8             |
| 3. В классификацию I                   | 519,5             | 3. Концентрат ММС-II-2    | 123,6             |
| 4. В ММС-I                             | 130,5             |                           |                   |
| 5. В классификацию II                  | 220,5             |                           |                   |
| 5. В ММС-II-1                          | 261,8             |                           |                   |
| Всего:                                 | 1249,2            | Всего:                    | 1249,2            |

Циркулирующие нагрузки в первой и второй стадиях измельчения рассчитывают по формуле (6.34).

Удельные производительности мельниц по классу –71 мкм в первой и второй стадиях измельчения рассчитывают по формуле (6.36). При этом к применению приняты мельницы МШЦ-4500х6000 с рабочим объемом  $V=82 \text{ м}^3$  (две мельницы в первой стадии измельчения и одна мельница во второй стадии измельчения).

Эффективности классификации в гидроциклонах по классу –71 мкм в первой и второй стадиях измельчения рассчитывают по формуле (6.37).

Объем пульпы, поступающей в гидроциклоны, рассчитывают по формуле, м<sup>3</sup>/ч:

$$V_{\text{п}} = Q_{\text{гц}} / \rho + W_{\text{в}}, \quad (6.47)$$

где  $Q_{\text{гц}}$  – производительность по твёрдому гидроциклонов, т/ч;  $\rho$  – плотность твёрдой фазы (руда, промпродукт) питания гидроциклонов, т/м<sup>3</sup>;  $W_{\text{в}}$  – расход воды в питании гидроциклонов, м<sup>3</sup>/ч.

При расчёте принято, что плотность твёрдой фазы питания гидроциклонов равна 4,0 и 4,7 т/м<sup>3</sup> соответственно в первой и второй стадиях измельчения.

Все результаты расчёта представлены в виде совмещённой качественно-количественной и водно-шламовой схемы, изображённой на листе формата А4 (рис. 6.7).

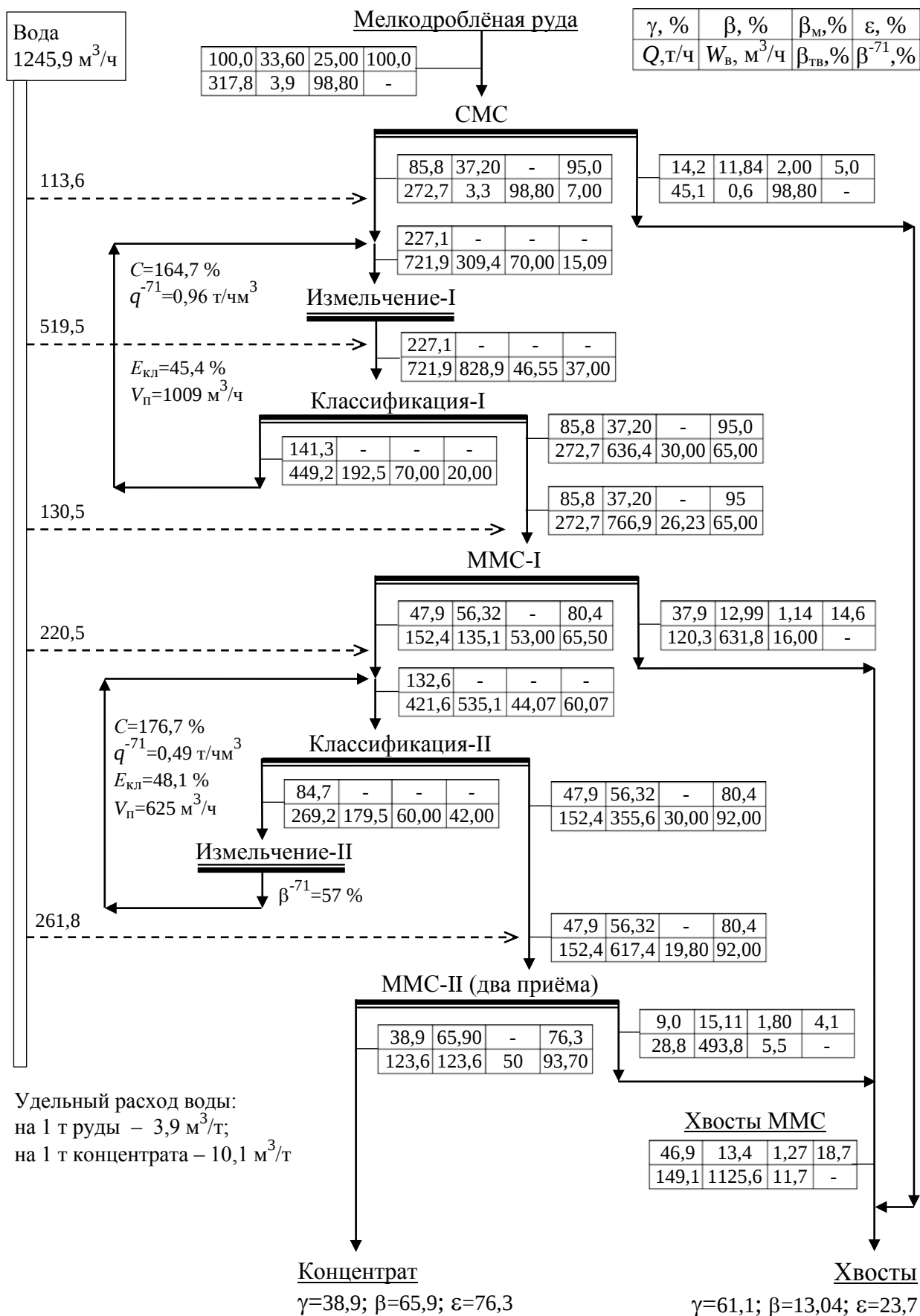


Рис. 6.7. Совмещённая качественно-количественная и водно-шламовая схема

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

### **Контрольные вопросы к главе 1**

1. Для каких руд магнитный метод обогащения является основным?
2. Зачем применяется магнитная сепарация на фабриках с тяжелосредним обогащением?
3. Зачем необходимо обезжелезивать концентраты неметаллических полезных ископаемых?
4. Приведите примеры использования магнитного метода в схемах переработки техногенного сырья.
5. На каком принципе основан магнитный метод обогащения?
6. Перечислите основные технологические задачи магнитных методов обогащения.
7. Как называются продукты разделения при магнитном обогащении?

### **Контрольные вопросы к главе 2**

1. Чем отличается индукция магнитного поля от напряжённости магнитного поля?
2. Чем отличается относительная магнитная проницаемость среды от абсолютной?
3. Перечислите основные силы, действующие на разделяемые частицы при магнитном обогащении.
4. Какая сила является основной при магнитном обогащении?
5. Как направлены магнитная сила и сила тяжести в магнитных сепараторах с нижней подачей материала?
6. Как направлены магнитная и центробежная силы в барабанных сепараторах?
7. Для какой среды проявляется в большей степени действие силы сопротивления среды при магнитном обогащении?
8. Как сказывается наличие большого количества пылевидных частиц в исходном продукте на показатели магнитного обогащения?
9. В какой продукт попадёт частица, если магнитная сила превышает равнодействующую механических сил?
10. В какой продукт попадёт частица, если магнитная сила меньше равнодействующей механических сил?
11. Запишите формулу магнитной силы.
12. Какие составляющие входят в магнитную силу, действующую на частицу?
13. Как повлияет увеличение напряжённости магнитного поля на магнитную силу?

14. Чему равна магнитная проницаемость вакуума или магнитная постоянная  $\mu_0$ ?
15. В каких единицах в системе СИ измеряется напряжённость магнитного поля?
16. В каких единицах в системе СИ измеряется индукция магнитного поля?
17. Как определяется шаг полюсов многополюсной магнитной системы?
18. Рассчитайте коэффициент неоднородности магнитного поля ( $c$ ) многополюсной плоской магнитной системы, если шаг полюсов равен 0,314 м.
19. Как изменится магнитная сила, действующая на частицы, при увеличении их размера, если разделение осуществляется в сепараторах с верхней подачей материала?
20. Переведите 2000 Э в кА/м.
21. Переведите 160 кА/м в Эрстеды.
22. Переведите 160 кА/м в Теслы при обогащении в воздухе.
23. Переведите 2 Тл в кА/м при обогащении в воде.
24. Как влияет крупность частиц на величину магнитной силы, действующей на частицы, при разделении в сепараторах с верхней и нижней подачей?
25. По какому физическому свойству осуществляется разделение при феррогидростатической сепарации?
26. От каких факторов зависит кажущаяся плотность ФМЖ в магнитном поле?
27. Какие силы и как действуют на разделяемые частицы в рабочей зоне ФГС-сепаратора?
28. На каком принципе основан электродинамический метод разделения?
29. Какими способами можно создать переменное магнитное поле?

### **Контрольные вопросы к главе 3**

1. Чем отличаются объёмная и удельная магнитные восприимчивости?
2. В каких единицах в системе СИ измеряется удельная магнитная восприимчивость?
3. В каких единицах в системе СИ измеряется объёмная магнитная восприимчивость?
4. Определите удельную магнитную восприимчивость минерала, если его объёмная магнитная восприимчивость равна 0,0035, а плотность равна 3500 кг/м<sup>3</sup>.
5. Какие минералы обогащают магнитными методами?
6. К какой группе минералов относится магнетит?
7. К какой группе минералов относится гематит?
8. К какой группе минералов относится кварц?
9. Чем отличаются магнитные восприимчивости тела и вещества для ферромагнетиков?

10. Что такое остаточная намагниченность?
11. Что такое коэрцитивная сила?
12. Какие тела называются магнитномягкими?
13. Какие тела называются магнитножесткими?
14. Чем отличаются методы Фарадея и Гюи для определения магнитной восприимчивости?
15. Какая химическая формула у магнетита?
16. Сколько железа содержится в магнетите?
17. Какая максимально возможная массовая доля железа может быть в концентрате при обогащении магнетитовой руды?
18. Как влияет крупность частиц магнетита на его магнитную восприимчивость?
19. Как влияет напряжённость внешнего магнитного поля на магнитную восприимчивость магнетита?
20. Как зависит магнитная восприимчивость сродка от массовой доли в нём магнетита?
21. Что такое магнитная флокуляция?

#### **Контрольные вопросы к главе 4**

1. Перечислите основные элементы магнитных сепараторов.
2. Что обозначает буква «П» в обозначении сепаратора 2ПБС-90/250?
3. Что обозначает буква «Э» в обозначении сепаратора ЭБС-80/170?
4. Что обозначает буква «Б» в обозначении сепаратора ПБМ-90/250?
5. Что обозначает буква «В» в обозначении сепаратора 2ЭВС-36/100?
6. Что обозначает буква «С» в обозначении сепаратора ПБС-90/150?
7. Что обозначает буква «М» в обозначении сепаратора ПБМ-120/300?
8. Что обозначает цифра «90» в обозначении сепаратора ПБМ-90/250?
9. Что обозначает цифра «250» в обозначении сепаратора ПБМ-90/250?
10. Что обозначает цифра «4» в обозначении сепаратора 4ЭВМ-40/250?
11. В каких единицах измерения приведены диаметр и длина барабана в обозначении магнитных сепараторов?
12. Что обозначают буквы «ПП» в обозначении сепаратора ПБМ-ПП-150/200?
13. В чем отличия барабанных сепараторов от шкивных?
14. Дайте характеристику и области использования подвесных железоотделителей.
15. Сравните аналогичные магнитные сепараторы с электромагнитной системой и системой из постоянных магнитов.
16. Из каких материалов изготавливаются постоянные магниты с повышенной энергией?

17. Как движутся исходный, магнитный и немагнитный продукты в сепараторе ПБМ-90/250?
18. Как движутся исходный, магнитный и немагнитный продукты в сепараторе ПБМ-П-90/250?
19. Как движутся исходный, магнитный и немагнитный продукты в сепараторе ПБМ-ПП-90/250?
20. В чём отличия сепараторов для регенерации суспензий от сепараторов для обогащения руд?
21. Как, при прочих равных условиях, изменится выход магнитного продукта, если увеличить скорость вращения барабана сухого сепаратора с верхней подачей материала?
22. Как, при прочих равных условиях, изменится выход магнитного продукта, если увеличить глубину ванны мокрого сепаратора с нижней подачей материала с 0,05 до 0,5 м?
23. Охарактеризуйте аппараты с замкнутыми магнитными системами.
24. Для обогащения каких руд применяются валковые сепараторы с сильным магнитным полем?
25. Чем ограничена максимальная крупность частиц при обогащении в валковых сепараторах?
26. За счёт чего в рабочей зоне валкового сепаратора достигается высокое значение индукции магнитного поля?
27. Чем заполняются матрицы высокоградиентных магнитных сепараторов?
28. Чем ограничена максимальная крупность частиц при обогащении в высокоградиентных сепараторах?
29. К какой группе сепараторов относится сепаратор «Sala-Carousels»?
30. В чём отличия сепаратора типа «Слон» от сепаратора «Джонса»?
31. Перечислите достоинства применения сепараторов со сверхпроводящими магнитными системами.
32. Для чего применяются магнитные дешламаторы?
33. Перед какими операциями схем обогащения магнетитовых руд устанавливаются размагничивающие аппараты?
34. Перечислите основные элементы феррогидростатических сепараторов.
35. Перечислите основные элементы электродинамического сепаратора с вращающейся магнитной системой из постоянных магнитов.
36. Влияет ли производительность магнитного сепаратора на технологические показатели разделения?
37. Влияет ли крупность исходного материала, при прочих равных условиях, на производительность магнитного сепаратора?

### **Контрольные вопросы к главе 5**

1. Перечислите основные промышленные типы железных руд.
2. В чём отличия железистых кварцитов от титаномагнетитовых руд?
3. Приведите примеры железорудных ГОКов России.
4. Перечислите вредные примеси для железного концентрата.
5. По какому принципу построены схемы обогащения магнетитовых и титаномагнетитовых руд?
6. Какие технологии применяются для повышения качества железных концентратов?
7. Какие особенности имеют схемы обогащения слабомагнитных руд?
8. В каких случаях можно применять обжигмагнитное обогащение?
9. Какие особенности имеют схемы обогащения ильменитсодержащих руд и россыпей?
10. Перечислите основные направления использования магнитных методов обогащения в схемах переработки техногенного сырья.

### **Контрольные вопросы к главе 6**

1. Что включает технологический расчёт схемы обогащения?
2. Запишите уравнения, используемые при расчёте технологического баланса.
3. Какие исходные данные необходимы для расчёта качественно-количественной схемы?
4. Запишите уравнения, используемые при расчёте обогатительных операций.
5. Запишите уравнения, используемые при расчёте замкнутых циклов измельчения.
6. В чём особенность расчёта замкнутого цикла измельчения с магнитной сепарацией между измельчением и классификацией?
7. Зачем рассчитывается водно-шламовая схема?
8. Какие исходные данные необходимы для расчёта водно-шламовой схемы?
9. Как рассчитать удельный расход воды на одну тонну руды?
10. Какие показатели приводятся на совмещённой качественно-количественной и водно-шламовой схеме?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агрикола Георгий. О горном деле и металлургии. М.: Недра, 1986. 294 с.
2. Азбель Ю. И. Оценка технологических возможностей нового поколения электромагнитных сухих валковых сепараторов высокой интенсивности // Обогащение руд. 1994. № 4-5. С. 19-21.
3. Блинов В. А., Короленко Н. В. Минеральное сырье. Титан: справочник. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998. 49 с.
4. Влияние размагничивания на процессы гидравлической классификации сильномагнитных руд / И. М. Ганженко, Т. Б. Зарщикова, Л. А. Камалова, Л. А. Алексеева, Е. М. Шестак, Э. К. Якубайлик // Обогащение руд. 2013. № 2. С. 13-16.
5. Губаревич В. Н. Разделение материалов в магнитных жидкостях. М.: Недра, 1987. 87 с.
6. ГОСТ 10512-93. Сепараторы магнитные и электромагнитные. Общие технические условия. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск, 1993.
7. Дацюк И. С. Магнитные поля сепараторов // XV лет на службе социалистического строительства: сб. Ин-та «Механобр», т.1. Л.: Изд-во ОНТИ, 1935.
8. Деркач В. Г., Дацюк И. С. Электромагнитные процессы обогащения. М.: Металлургиздат, 1947. 268 с.
9. Деркач В. Г. Магнитное обогащение слабомагнитных руд. М.: Металлургиздат, 1954. 296 с.
10. Деркач В. Г., Копычев П. А. Специальные методы обогащения полезных ископаемых. М.: Металлургиздат, 1956. 344 с.
11. Деркач В. Г. Динамика движения руды на барабанном сепараторе // Обогащение руд. 1960. № 6.
12. Деркач В. Г. Динамика движения руды в магнитных сепараторах с нижним питанием // Обогащение руд. 1964. № 3.
13. Деркач В. Г. Специальные методы обогащения полезных ископаемых. М.: Недра, 1966. 338 с.
14. Дорошенко М. В., Башлыкова Т. В. Технологические свойства минералов: справочник для технологов. М.: Теплоэнергетик, 2007. 296 с.
15. Евсиович С. Г., Журавлёв С. И. Обогащение магнетитовых руд. М.: Недра, 1972. 392 с.
16. Железорудная база России / под ред. В. П. Орлова, М. И. Веригина, Н. И. Голивкина. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998. 842 с.
17. Журавлев С. И. Обогащение магнетитовых руд контактово- и гидротермально-метасоматического генезиса. М.: Недра, 1978. 152 с.

18. Испытание технологии получения гематитовых концентратов из хвостов обогатительной фабрики ОАО «Михайловского ГОК» / С. И. Кретов, С. Л. Губин, Т. В. Игнатова, В. А. Сентемова, Ю. С. Безногова // Обогащение руд. 2007. № 6.
19. Кармазин В. В., Кармазин В. И. Магнитные и электрические методы обогащения: учебник для вузов. М.: Недра, 1988. 304 с.
20. Кармазин В. В., Младецкий И. К., Пилов П. И. Расчёты технологических показателей обогащения полезных ископаемых: учебное пособие. М.: Изд-во МГГУ, 2006. 221 с.
21. Кармазин В. В., Кармазин В. И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых: учебник. В 2 т. М.: Горная книга, 2012. Т. 1: Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. 672 с.
22. Кармазин В. И. Современные методы магнитного обогащения руд чёрных металлов. М.: Госгортехиздат, 1962. 483 с.
23. Кармазин В. И., Кармазин В. В. Магнитные методы обогащения: учебник для вузов. М.: Недра, 1978. 255 с.
24. Кармазин В. И. Технология обогащения руд чёрных металлов. М.: Недра, 1982.
25. Кармазин В. И., Кармазин В. В. Магнитные методы обогащения. М.: Недра, 1984. 416 с.
26. Кармазин В. И., Губаревич В. Н., Алипов А. И. Исследование магнитного поля в ферромагнитной жидкости, расположенной в межполюсном зазоре ФГС-сепаратора // Обогащение руд. 1985. № 3. С. 25-27.
27. Квасков А. П. Технологическая эффективность и схемы обогащения железных руд магнетитового типа // Труды института Механобр, вып. 105, 1958.
28. Корнилков С. В., Дмитриев А. Н., Пелевин А. Е., Яковлев А. М. Раздельная переработка руд Гусевгорского месторождения // Горный журнал. 2016. № 5. С. 86-90.
29. Кравец Б. Н. Специальные и комбинированные методы обогащения: учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 304 с.
30. Кравец Б. Н., Эрдэнэцогт П., Пелевин А. Е. Специальные и комбинированные методы обогащения: учебно-научное издание. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. 314 с. (на русском и монгольском языках).
31. Кравченко Н. Д., Кармазин В. В. Магнитная сепарация отходов цветных металлов. М.: Металлургия, 1986. 120 с.
32. Левицкий А. М. Зарубежные быстроходные барабанные сепараторы для сухого магнитного обогащения железных руд // Обогащение руд. 1963. № 4.
33. Ленуар М. Р., Гладков С. А. Новые направления в конструировании сухих магнитных сепараторов высокой напряжённости на постоянных магнитах // Обогащение руд. 1998. № 4. С. 35-37.
34. Ломовцев Л. А., Кравец Б. А., Давыдов Ю. А. Оборудование для магнитного обогащения слабомагнитных руд за рубежом. М., 1985 (Обзорная информация / Ин-т «Черметинформация», сер. Обогащение руд, вып. 2. 23 с.).

35. Ломовцев Л. А., Нестерова Н. А., Дробченко Л. А. Магнитное обогащение сильномагнитных руд. М.: Недра, 1979. 235 с.
36. Месеняшин А. И. Электрическая сепарация в сильных полях. М.: Недра, 1978.
37. Минералогический справочник технолога-обогапителя / Б. Ф. Куликов, В. В. Зуев, И. А. Вайншенкер, Г. А. Митенков. Л.: Недра, 1985. 264 с.
38. Минеральное сырьё: от недр до рынка. Т.3. Чёрные, легирующие металлы и некоторые неметаллы / под ред. А. П. Ставского. 2-е изд. М.: Научный мир, 2011. 624 с.
39. Олофинский Н. Ф. Электрические методы обогащения. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1977. 519 с.
40. Остапенко П. Е. Теория и практика обогащения железных руд. М.: Недра, 1985. 270 с.
41. Патент № 2014148 Российская Федерация, МКП В03С1/10. Магнитный сепаратор / А. Е. Пелевин, Е. Ф. Цыпин, О. А. Пермикина, Л. М. Балабаева. – № 4903548/03; заявл. 27.11.90; опубл. 15.06.94. Бюл. № 11. – 4 с.: ил.
42. Патент № 2170621 Российская Федерация, МПК В03С1/32. Магнитогидростатический центробежный сепаратор / М. П. Казимиров, В. А. Дюнов, С. И. Евдокимов, А. Б. Солоденко. – № 2000116820/03; заявл. 26.06.2000; опубл. 27.12.2003, бюл. № 36.
43. Патент № 2241544 Российская Федерация, МПК В03В7/00, В03С1/00. Способ обогащения магнетитовых руд / М. А. Крупин, Р. А. Гельбинг, А. В. Жильцов, В. П. Бобров, А. Г. Сухарев. – № 2003101018/03; заявл. 14.01.2003; опубл. 20.07.2004, бюл. № 34.
44. Патент № 2339452 Российская Федерация, МПК В03С1/32. Способ разделения частиц по плотности и устройство для его осуществления / А. А. Солоденко, А. М. Паньшин, С. И. Евдокимов, С. И. Казимиров, А. Б. Солоденко. – № 2007107772/03; заявл. 01.03.2007; опубл. 27.11.2008, бюл. № 33.
45. Патент № 2365421 Российская Федерация, МПК В03С1/247. Магнитный сепаратор / С. И. Кретов, В. В. Кармазин, И. В. Палин, Н. Г. Синельникова, Ю. М. Пожарский. – № 2008114626/03; заявл. 17.04.2008; опубл. 27.08.2009, бюл. № 24.
46. Патент № 2366511 Российская Федерация, МКП В03В7/00, В03С1/00. Способ обогащения железосодержащих руд / В. В. Кармазин, Н. Г. Синельникова, И. В. Палин, Т. Н. Гзогян. – № 2008114625; заявл. 17.04.08. опубл. 10.09.09. Бюл. № 25.
47. Патент № 2432207 Российская Федерация, МПК В03С1/00. Способ обогащения железных руд сложного вещественного состава / С. А. Потапов, Ю. М. Рудской, С. Л. Губин, В. М. Авдохин, Н. М. Евдокимов, Э. В. Шелепов – № 2010113875/03; заявл. 08.04.2010; опубл. 27.10.2011, бюл. № 30.
48. Патент № 2460584 Российская Федерация, МПК В03С1/247. Магнитный сепаратор / В. В. Кармазин, В. Г. Андреев, С. И. Кретов, Ю. М. Пожарский, Н. П. Кармазина. – № 2011107577/03; заявл. 01.03.2011; опубл. 10.09.2012, бюл. № 25.

49. Патент № 2491131 Российская Федерация, МПК В03С1/32. Устройство для разделения частиц по плотности / А. А. Солоденко, С. И. Евдокимов, А. Б. Солоденко. – № 2012107850/03; заявл. 01.03.2012; опубл. 27.08.2013, бюл. № 24.
50. Патент № 2492933 Российская Федерация, МПК В03С1/10. Способ магнитной сепарации и устройство для его осуществления / А. Е. Пелевин, Н. А. Сытых, Ант. Анд. Мушкетов. – № 2010153922/03; заявл. 27.12.2010; опубл. 20.09.2013, бюл. № 26.
51. Пелевин А. Е. Разделение вторичных металлов в магнитных и электрических полях: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1996. 100 с.
52. Пелевин А. Е. Обогащение магнетитовых руд в сепараторах бегущего магнитного поля // Известия вузов. Горный журнал. 2001. № 2. С. 118-122.
53. Пелевин А. Е. Электродинамическая сепарация проводников тока // Известия вузов. Горный журнал. 2001. № 4-5. С. 54-59.
54. Пелевин А. Е. Стадиальное выделение железного концентрата // Обогащение руд. 2007. № 3. С. 10-15.
55. Пелевин А. Е. Технология обогащения магнетитовых руд и пути повышения качества концентратов // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 4. С. 20-28.
56. Пелевин А. Е., Лазебная М. В. Применение грохотов «Деррик» в замкнутом цикле измельчения на обогатительной фабрике ОАО «Комбинат КМАруда» // Обогащение руд. 2009. № 2. С. 4-8.
57. Пелевин А. Е. Тонкое грохочение и его место в технологии обогащения железных руд // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 4. С. 110-117.
58. Пелевин А. Е. Магнитные и электрические методы обогащения: учебное пособие. 3-е изд., испр. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. 159 с.
59. Пелевин А. Е., Сытых Н. А. Стадиальное выделение железного концентрата с помощью барабанного магнитного сепаратора с модифицированной ванной // Обогащение руд. 2016. № 4. С. 10-15.
60. Перспективные направления совершенствования техники и технологии магнитно-флокуляционной сепарации золотосодержащих руд и песков / В. П. Мязин, Р. Б. Закиев, Н. И. Закиева, О. И. Рыбакова // Горный журнал. 2002. № 2. С. 56-60.
61. Полькин С. И., Адамов Э. В. Обогащение руд цветных металлов: учебник для вузов. М.: Недра, 1988. 400 с.
62. Полькин С. И., Лаптев С. Ф. Обогащение оловянных руд и россыпей. М.: Недра, 1974. 480 с.
63. Разумов К. А., Перов В. А. Проектирование обогатительных фабрик: учебник для вузов. 4-е изд. М.: Недра, 1982. 518 с.
64. Разработка и внедрение магнитно-флокуляционных и комбинированных процессов и аппаратов обогащения золотоносных, ртутьсодержащих песков как основа природоохранных технологий / В. В. Кармазин, П. А. Сыса, В. А. Малахов и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1999. № 1. С. 30-36.
65. Сентемова В. А. Испытания флотационной технологии повышения качества железных концентратов // Обогащение руд. 2009. № 3. С. 17-21.

66. Справочник по обогащению руд. Основные и вспомогательные процессы. Ч.1: Основные процессы / под ред. О. С. Богданова. М.: Недра, 1974. 448 с.
67. Справочник по обогащению руд. Основные процессы / под ред. О. С. Богданова. 2-е изд. М.: Недра, 1983. 381 с.
68. Справочник по обогащению руд. Обогащительные фабрики / под ред. О. С. Богданова. 2-е изд. М.: Недра, 1984. 358 с.
69. Справочник по обогащению руд чёрных металлов / под ред. С. Ф. Шинкоренко. 2-е изд. М.: Недра, 1980. 527 с.
70. Стафеев А. А. Обогащение железной руды с применением технологии магнитной гидросепарации // Горный журнал. 2012. № 4. С. 56-58.
71. Урванцев А. И. Энергосепарация минерального сырья. Екатеринбург, 2015. 228 с.
72. Физические основы электрической сепарации / А. И. Ангелов, И. П. Верещагин, В. С. Ершов, С. И. Лосаберидзе, В. С. Морозов, М. М. Пашин / под ред. В. И. Ревнивцева. М.: Недра, 1983. 271 с.
73. Чантурия В. А., Дмитриева Г. М., Трофимова Э. А. Интенсификация обогащения железных руд сложного вещественного состава. М.: Наука, 1988.
74. Шубов Л. Я., Ройзман В. Я., Дуденков С. В. Обогащение твёрдых бытовых отходов. М.: Недра, 1987. 238 с.
75. <http://www.rudgormash.ru>.
76. <http://www.metso.ru>.
77. <http://www.sdhuate.com>, <http://www.sdseparator.ru>.
78. <http://www.mtspb.com>.
79. <http://www.erga.ru>.
80. <http://www.eriez.com>
81. <http://www.metalloinvest.ru>.
82. <http://www.itomak.ru>.
83. <http://www.grant-geo.ru>.

Учебное издание

Алексей Евгеньевич Пелевин

МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ

МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ

*Учебник*

Редактор *Л. В. Устьянцева*

Компьютерная верстка *А. Е. Пелевин*

Подписано в печать 21.05.2018 г. Бумага писчая. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>

Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.

Печ. л. 18,375. Уч.-изд. л. 19,6. Тираж 200. Заказ № 1082-18/28088.

Издательство УГГУ

620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Уральский государственный горный университет

Отпечатано с оригинал-макета в ООО «Амирит»,

410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 88.