

**В.Д. Самыгин  
В.А. Игнаткина  
Р.В. Коржова**

**ОБЕЗВОЖИВАНИЕ И ОЧИСТКА  
СТОЧНЫХ ВОД ПРИ ОБОГАЩЕНИИ  
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ  
(разделение твердой и жидкой фаз)**

**ОБЕЗВОЖИВАНИЕ И ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД  
ПРИ ОБОГАЩЕНИИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

**№ 2312**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра обогащения руд цветных и редких металлов

В.Д. Самыгин  
В.А. Игнаткина  
Р.В. Коржова

# **Обезвоживание и очистка сточных вод при обогащении минерального сырья (разделение твердой и жидкой фаз)**

Учебник

Допущено учебно-методическим объединением  
по образованию в области металлургии в качестве  
учебника для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению Металлургия



Москва 2013

УДК 622.7:628.1  
С17

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *А.С. Медведев*;  
д-р техн. наук, проф., акад. АН Республики Таджикистан *П.М. Соложенкин*

**Самыгин, В.Д.**

С17      **Обезвоживание и очистка сточных вод при обогащении минерального сырья (разделение твердой и жидкой фаз) : учеб. / В.Д. Самыгин, В.А. Игнаткина, Р.В. Коржова. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2013. – 247 с.**

ISBN 978-5-87623-696-8

Рассмотрены физические и физико-химические основы процессов разделения твердой и жидкой фаз при обезвоживании для процессов дренирования, отстаивания, агрегирования, центрифугирования, фильтрования и сушки. Изложены принципы выбора оборудования и технологических схем обезвоживания. Рассмотрены методы очистки сточных вод, организация водоборота и хвостового хозяйства обогатительных предприятий.

Учебник создан для дисциплин «Обезвоживание и обратное водоснабжение» и «Очистка сточных вод» магистерской подготовки по программе «Технология минерального сырья», а также дисциплины «Методы разделения жидкой и твердой фаз» для подготовки бакалавров профиля «Технология минерального сырья».

Предназначен для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Металлургия». Будет полезен студентам, обучающимся по специальности «Обогащение полезных ископаемых» направления «Горное дело». Представляет интерес для специалистов, связанных с переработкой минерального сырья на обогатительных фабриках и металлургических заводах.

УДК 622.7:628.1

ISBN 978-5-87623-696-8

© В.Д. Самыгин,  
В.А. Игнаткина,  
Р.В. Коржова, 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	6
1. Разделение жидкой и твердой фаз. Общие сведения .....	8
1.1. Технологические показатели процесса обезвоживания и очистки сточных вод .....	8
1.2. Классификация двухфазных систем. Процессы разделения твердой и жидкой фаз .....	8
1.3. Формы связи воды с твердым телом. Энергия связи различных форм воды с твердым телом .....	10
1.4. Влагоудерживающая способность твердых тел. Влияние основных факторов на степень обезвоживания .....	13
2. Обезвоживание кускового материала дренированием .....	15
2.1. Гидродинамика течения жидкости под влиянием гравитационной силы .....	15
2.2. Оборудование для дренирования. Схемы обезвоживания кускового материала .....	19
3. Отстаивание под действием силы тяжести .....	25
3.1. Основные понятия. Классификация суспензий .....	25
3.2. Способы выражения и расчета концентрации твердого в пульпе ...	27
3.3. Исследование скорости расслоения суспензий I и II типов методом длинной трубки .....	29
3.4. Качественное описание процесса расслоения суспензий III и IV типов .....	32
3.5. Расчет удельной поверхности сгущения по методу Коу и Клевенжера .....	34
3.6. Расчет удельной поверхности по методу Кинша .....	36
3.7. Определение высоты сгустителя .....	37
3.8. Пример расчета сгустителя по методу Кинша .....	39
3.9. Классификация сгустителей .....	41
3.10. Другие аппараты разделения твердой и жидкой фаз в поле гравитационных сил .....	53
3.11. Вспомогательное оборудование для разгрузки сгустителей .....	56
4. Применение агрегирования тонких суспензий и пульп для интенсификации процесса сгущения .....	59
4.1. Теория процесса агрегирования .....	59
4.2. Поверхностные силы. Переходный слой. Расклинивающее давление .....	68

4.3. Природа поверхностных сил и их вклад в работу прилипания .....	71
4.4. Природа ионно-электростатических сил.....	74
4.5. Гидрофобная слагающая поверхностных сил расклинивающего давления.....	78
4.6. Коагуляция и флокуляция.....	81
4.7. Классификация флокулянтов и условия их смешивания.....	85
4.8. Основные принципы селективной агрегации частиц.....	91
5. Использование центробежной силы при обезвоживании.....	99
5.1. Особенности применения гидроциклонов для обезвоживания .....	99
5.2. Особенности применения центрифуг для сгущения суспензий ....	103
5.3. Основные закономерности разделения суспензии в осадительных центрифугах. Индекс производительности .....	104
5.4. Физические основы разделения суспензий в фильтрующих центрифугах.....	107
5.5. Конструкции центрифуг. Периодически и непрерывно действующие центрифуги. Классификация центрифуг по способу выгрузки осадка .....	109
6. Фильтрация.....	115
6.1. Основные понятия. Классификация .....	115
6.2. Физические основы фильтрации с образованием осадка. Гидродинамика течения жидкости через пористые и зернистые слои .....	117
6.3. Основное уравнение фильтрации.....	120
6.4. Определение оптимальных условий работы фильтров. Экономически выгодный цикл фильтрации.....	123
6.5. Применение уравнения фильтрации. Определение удельного сопротивления осадка и его сжимаемости.....	124
6.6. Фильтровальные перегородки.....	127
6.7. Конструкции фильтров .....	129
6.8. Выбор и расчет фильтров .....	148
6.9. Схемы присоединения вакуум-фильтров. Организация работы фильтр-прессов .....	149
7. Сушка.....	155
7.1. Основные понятия. Параметры, подлежащие расчету .....	155
7.2. Движущая сила процесса сушки. Кинетика сушки. Напряжение объема сушки.....	157

7.3. Основные параметры влажного воздуха .....	161
7.4. Диаграмма влажного воздуха (диаграмма Рамзина) .....	162
7.5. Решение задач с применением диаграммы Рамзина .....	164
7.6. Материальный и тепловой баланс сушки.....	166
7.7. Расчет удельных расходов воздуха и тепла на действительную сушку по диаграмме Рамзина .....	169
7.8. Расчет сушилки в случае частичной рециркуляции отработанного воздуха .....	172
7.9. Сушка топочными газами .....	174
7.10. Конструкции сушилок.....	178
7.11. Выбор и расчет барабанных сушилок.....	187
8. Очистка сточных вод.....	189
8.1. Характеристика сточных вод цветной металлургии .....	189
8.2. Характеристика загрязнений и предельно допустимые концентрации вредных веществ в воде водоемов .....	190
8.3. Классификация загрязняющих примесей по фазово- дисперсному состоянию и рекомендуемые методы их удаления .....	193
8.4. Классификация процессов очистки сточных вод. Их общая характеристика .....	194
8.5. Обратное водоснабжение обогатительных фабрик. Использование хвостохранилищ в качестве очистных сооружений.....	211
8.6. Принципиальная схема очистки сточных вод химическим методом.....	222
8.7. Очистка подотвальных и шахтных вод с получением товарных продуктов .....	224
9. Организация хвостового хозяйства обогатительных фабрик.....	228
9.1. Состав хвостового хозяйства .....	228
9.2. Классификация хвостохранилищ .....	229
9.3. Расчет основных параметров хвостохранилища .....	230
9.4. Характеристика сооружений хвостохранилища.....	231
9.5. Способы складирования отвальных хвостов .....	238
9.6. Пример расчета водно-шламовой схемы обезвоживания.....	241
9.7. Материальный баланс технологической схемы очистки сточной воды.....	244
Библиографический список.....	246

## ВВЕДЕНИЕ

Разделение твердой и жидкой фаз имеет место в процессах обезвоживания (сгущение, фильтрование, сушка), очистки сточных вод (отстаивание, фильтрование, обезвоживание осадков), в технологических процессах гидрометаллургии, химического производства, флотационного обогащения, обесшламливания и т.п.

подавляющее большинство процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья протекает в воде. Вода является средой разделения (гравитация, флотация, мокрая магнитная сепарация), способствует разрушению минеральных ассоциаций (измельчение, дезинтеграция, промывка и т.п.), обеспечивает транспортировку минерального сырья между операциями. Результаты технологических операций во многом определяются соотношением жидкого и твердого в питании, поступающем в аппарат разделения. Существуют определенные требования к качественно-количественному составу технологической воды: содержанию и дисперсности взвешенных частиц, ионо-молекулярному составу.

Расширение минерально-сырьевой базы страны за счет вовлечения в переработку труднообогатимых полезных ископаемых сопровождается увеличением потребления воды. Рациональное использование природных ресурсов требует разработки комплексных технологий переработки полезных ископаемых и применения на обогатительных фабриках оборотного водоснабжения за счет эффективных технологий водоподготовки технической воды.

Назначение обезвоживания – удаление свободной воды (гравитационной и капиллярной влаги) из концентратов обогащения и любых твердых продуктов до требуемых кондиций.

Назначение очистки сточных вод – удаление загрязняющих примесей, в том числе твердой фазы из очищаемых вод.

Назначение обесшламливания – удаление твердых частиц определенной дисперсности, как правило, менее 20...10 мкм, затрудняющих последующие операции обогащения.

Назначение сгущения в технологических схемах – удаление избыточной воды для создания требуемого содержания твердого в питании, поступающем в технологическую операцию.

Обезвоживание твердого материала представляет собой совокупность процессов, последовательное применение которых позволяет максимально удалить воду (влагу) из концентратов и любых других

продуктов обогащения или концентрирования твердой фазы (осадков, шламов). На рисунке приведена схема изменения содержания твердого в продуктах обогащения при последовательном применении процессов обезвоживания:



Процессы обезвоживания в обогащении

Конечное содержание влаги в концентрате и других товарных продуктах не должно препятствовать транспортировке твердого материала потребителю и нарушать дальнейшую их технологическую переработку.

Реализация обезвоживания является затратным процессом по капитальным и эксплуатационным расходам. Стоимость обезвоживания при переработке минерального сырья составляет не менее 30 % от общей ее стоимости. На сооружения для обработки осадков сточных вод приходится около 50 % затрат на строительство и эксплуатацию очистных сооружений.

Задача курса – познакомить студентов с процессами разделения твердой и жидкой фаз применительно к методам обезвоживания и очистки сточных вод; изложить физические и физико-химические закономерности, лежащие в их основе; научить основным принципам выбора и расчета соответствующих аппаратов.

# 1. РАЗДЕЛЕНИЕ ЖИДКОЙ И ТВЕРДОЙ ФАЗ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

## 1.1. Технологические показатели процесса обезвоживания и очистки сточных вод

При рассмотрении технологических процессов обезвоживания и очистки сточных вод наиболее часто используются следующие показатели:

- содержание твердого – отношение доли массы твердого к доле массы жидкого в пульпе;
- влажность, % – отношение массы воды к массе твердого с водой, показатель содержания воды в физических телах или средах;
- разжижение – отношение жидкого к твердому по массе, численно равное массе воды на 1 т твердого;
- концентрация твердого, г/л – масса твердого в 1 л воды;
- производительность по объему пульпы, м<sup>3</sup>/ч – объем пульпы в единицу времени;
- производительность по твердому, т/ч – масса твердого (концентрата, осадка) в единицу времени;
- расход воды, м<sup>3</sup>/ч – объем воды (технологической, свежей, сточной, оборотной) в единицу времени;
- концентрация загрязняющих примесей, г/л – масса загрязняющих веществ в 1 л воды;
- гидравлическая крупность грубодисперсных примесей, мм/с – обобщающий показатель скорости осаждения частиц при их равномерном падении в неподвижной среде жидкости (воде);
- эффективность очистки сточной воды, % – относительная доля удаленных примесей по отношению к их исходной концентрации.

## 1.2. Классификация двухфазных систем. Процессы разделения твердой и жидкой фаз

При обезвоживании приходится отделять твердые частицы от воды. Гетерогенные системы, содержащие вещества в двух различных агрегатных состояниях, называют *двухфазными*.

Поведение двухфазных систем определяется в основном концентрацией твердого и размером минеральных частиц. Чем меньше размер минеральных частиц и их концентрация, тем ближе свойства двухфазных систем к однофазной – жидкости.

В продуктах обогащения, подлежащих обезвоживанию, встречается самый широкий диапазон размеров частиц – от 10 мм до единиц микрометра. Содержание твердого в исходных продуктах обогащения колеблется в пределах – от 5 до 50 %, чаще 10–20 %.

В настоящее время двухфазные системы принято разбивать на ряд подсистем в зависимости от размера минеральных частиц, их концентрации. На рис. 1.1 приведена классификация двухфазной системы твердое – жидкое в зависимости от дисперсности твердого с указанием основных процессов их разделения и движущей силы в этих процессах.

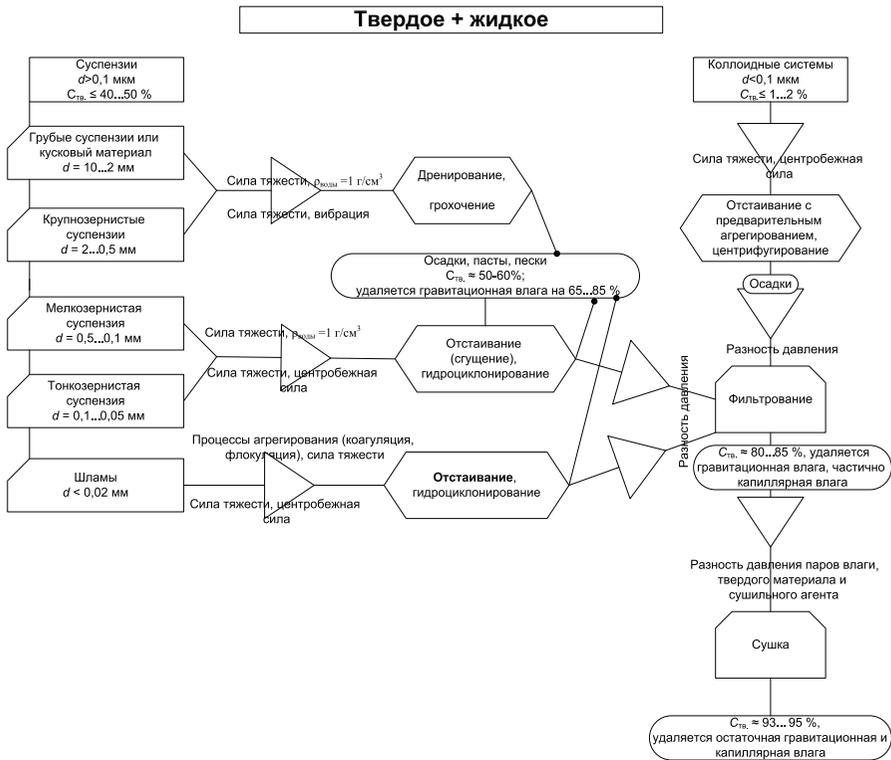


Рис. 1.1. Классификация процессов разделения твердой и жидкой фаз

Например, процесс дренирования (дренаж) представляет собой свободное вытекание жидкости под действием силы тяжести из межзеренного пространства кускового материала, что сближает этот процесс с фильтрованием воды через зернистую загрузку. Дренаж

наиболее часто применяется при обезвоживании углей, гравитационных концентратов редкометалльного сырья, марганцевых руд, железных и марганцевых концентратов магнитной сепарации и др.

При грохочении к силе тяжести воды добавляется сила вибрации и небольшая центробежная сила.

Сгущение происходит под действием сил тяжести, но по сравнению с дренированием происходит не вытекание жидкости, а осаждение частиц, обладающих большей плотностью, чем вода.

Для ускорения осаждения шламов и коллоидов в системе разделения дополнительно применяется центробежная сила, либо частицы укрупняются за счет предварительного агрегирования (коагуляция или флокуляция), для чего используются специальные реагенты.

Механические методы обезвоживания легче описать с помощью двух физических процессов:

- 1) оседания частиц в жидкости с переменной вязкостью;
- 2) фильтрации воды через поры.

Первый метод применяют для сгущения материала до 50...70 % твердого (Т:Ж = 1:1 или 1:0,4); при этом необходимо учитывать направление и скорость потоков в сгустителях.

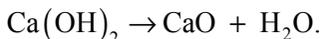
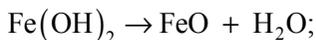
Процесс отделения воды из двухфазной системы, содержащей более 50 % твердого, легче представить как фильтрование через пористый и сжимаемый во времени осадок.

### **1.3. Формы связи воды с твердым телом. Энергия связи различных форм воды с твердым телом**

На практике нельзя достичь необходимого обезвоживания за счет применения только одного из методов обезвоживания. Это связано с тем, что влага на поверхности минеральных частиц и в каналах осадка удерживается различными силами:

- химическими,
- физическими,
- капиллярными.

Химически связанную воду, например в гидроксидах  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , называют *конституционной*. Влага из этих соединений удаляется, как правило, при высокой температуре порядка 500...1000 °С;



Координационно-химически связанную воду в кристаллогидратах ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) называют *кристаллизационной водой*, которая удаляется нагреванием при более низких температурах. Например: сульфат меди  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (синий) при нагревании выше  $105^\circ\text{C}$  переходит в тригидрат  $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (голубой), при  $150^\circ\text{C}$  – в моногидрат  $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (белый); полное удаление кристаллизационной воды происходит при температуре выше  $250^\circ\text{C}$ .

Физически адсорбированную воду на поверхности твердых тел часто называют пленочной и гигроскопической. Гигроскопичность можно связать с поглощением паров воды за счет их конденсации в микропорах. Пленка воды на непогруженных зернах твердого является адгезионной.

Увеличение адсорбции воды в тонких порах менее  $10 \text{ \AA}$  вызвано перекрытием полей сил Ван-дер-Ваальса от противоположных стенок, что способствует возрастанию сил притяжения по сравнению с плоской поверхностью.

Давление паров воды зависит от кривизны поверхности раздела жидкость–газ и радиуса пор согласно уравнению Кельвина:

$$\ln \frac{P}{P_0} = \frac{2\sigma V_M}{rRT} \cos \theta,$$

где  $P$  и  $P_0$  – давление паров воды соответственно над искривленной и

плоской поверхностями, Па;

$\sigma$  – поверхностное натяжение, Дж/м<sup>2</sup>;

$V_M$  – молярный объем адсорбированной воды, м<sup>3</sup>/кмоль;

$\theta$  – краевой угол смачивания, град;

$r$  – радиус пор, м;

$R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

$T$  – абсолютная температура, К.

Если вода смачивает поры диаметром больше, чем  $10 \text{ \AA}$ , имеющиеся в твердом теле или осадке, то она снова будет задерживаться в них капиллярными силами.

Влага, удерживаемая в порах осадка капиллярными силами, называется *капиллярной*.

Вода имеет конечную скорость вытекания из межзеренного пространства. Эта скорость падает по мере уменьшения гидростатического напора при вытекании, поэтому вода не успевает вытечь из пористой системы за время ее удаления в каком-либо аппарате.

Влага, остающаяся в осадке по этой причине, называется *гравитационной*. Она не удерживается ни поверхностными, ни капиллярными силами. Гравитационная влага обычно содержится в обводненных продуктах обогащения, когда количество воды настолько велико, что мениски в капиллярах отсутствуют.

На рис. 1.2 приведена классификация видов связи воды с зернами твердого материала.

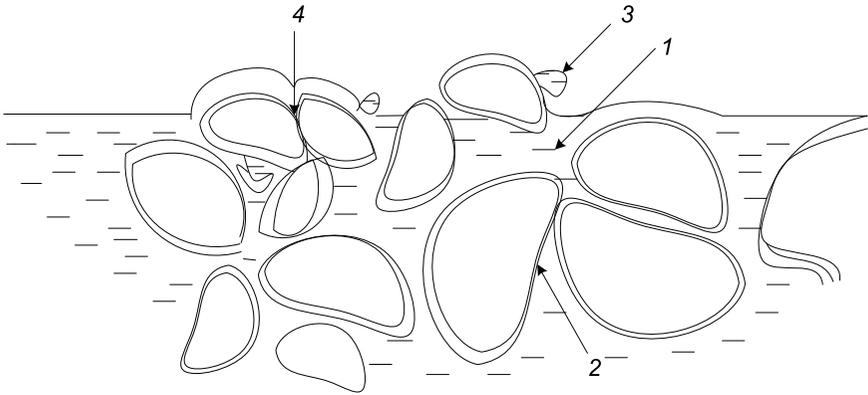


Рис. 1.2. Классификация видов связи воды с зернами твердого материала:  
1 – гравитационная; 2 – адсорбционная (пленочная);  
3 – адгезионная; 4 – капиллярная

При обезвоживании удаляются гравитационная и капиллярная вода.

Энергию связи воды с поверхностью твердого тела можно оценить. Энергия связи конституционной воды равна тепловому эффекту реакции разложения гидроксида металла до его оксида, что в среднем составляет 418,68...837,36 кДж/моль (100...200 ккал/моль).

Тепловой эффект реакции при отщеплении кристаллизационной воды меньше и составляет десятки-сотни килоджоулей на моль (десятки килокалорий на моль). Дифференциальная теплота адсорбции паров  $q$  зависит от степени заполнения поверхности. При малых заполнениях  $q$  порядка 2–3  $L$  ( $L$  – скрытая теплота конденсации, кДж/кг) в тонких порах (диаметром менее 10 Å), где удерживается гигроскопическая влага, дифференциальная теплота адсорбции почти не уменьшается для второго и третьего слоев.

Энергию удаления капиллярной удерживаемой влаги можно оценить по величине работы перемещения объема жидкости с высоты, соответ-

ствующей капиллярному подъему, до уровня жидкости в широком сосуде. Аналогично оценивается энергия удаления гравитационной влаги по необходимому перепаду давления (против сил вязкости).

Для строгого проведения расчетов такого рода необходимо точно знать величины поверхностей твердых частиц, размер пор, а также диаметр капилляров, образующихся в осадке. Поэтому на практике для описания свойств твердой поверхности в жидкой фазе используются обобщающие показатели.

#### **1.4. Влагоудерживающая способность твердых тел. Влияние основных факторов на степень обезвоживания**

Влагоудерживающая способность продуктов обогащения в первую очередь определяется гранулометрическим составом минеральных частиц и величиной смачиваемости их поверхности жидкостью, а также наличием пор в частицах.

При уменьшении размера минеральных частиц отделение их от воды затрудняется по следующим причинам: падает скорость осаждения, уменьшается сила тяжести, быстрее увеличивается вязкость суспензии при наличии в ней мелких частиц, в осадке образуются более тонкие капилляры, что затрудняет вытекание из них жидкости. Возрастает роль капиллярных сил и доля влаги, удерживаемой ими. Возрастает величина поверхности частиц и, следовательно, доля адсорбционно удерживаемой воды. Мелкие частицы могут также закупоривать капилляры, имеющиеся между крупными частицами в осадке.

С ростом смачиваемости поверхности водой увеличивается доля адсорбционно связанной воды. Обычно эту влагу нецелесообразно удалять даже при сушке, так как адсорбционная влага находится в равновесии с парами воды атмосферного воздуха.

Степень гидратации поверхности определяется величиной смачиваемости и оказывает большое влияние на агрегирование частиц. Гидратные слои препятствуют агрегированию частиц, а в отсутствие агрегирования скорость осаждения твердой фазы всегда меньше. В случае образования агрегатов из частиц осаждение значительно ускоряется.

Влагоудерживающая способность также определяется пористостью самих твердых частиц. Минералы по степени пористости условно разделяются на три класса:

- макропористые (размер пор более  $2 \cdot 10^{-4}$  мм);
- переходные (размер пор  $6 \cdot 10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-4}$  мм);
- микропористые (размер пор  $2 \cdot 10^{-6} \dots 6 \cdot 10^{-6}$  мм).

Степень пористости минералов определяет величину внутренней поверхности, а также сказывается на характере адсорбции воды. Удельная внутренняя поверхность макропор относительно мала, поэтому на их стенках адсорбируется незначительное количество воды. На поверхности переходных пор удерживается большое количество адсорбированной влаги. Размеры микропор, как уже отмечалось, приближаются к размерам адсорбируемых молекул воды, и адсорбция в микропорах приводит к заполнению их объема. Такие тела обычно называют *гигроскопичными*, и они удерживают значительное количество влаги.

В больших порах диаметром более  $2 \cdot 10^{-4}$  мм и малых порах, сравнимых с диаметром молекул воды, явление капиллярной конденсации отсутствует. Ранее приведенное уравнение Кельвина применимо, следовательно, не только к капиллярным системам, образующимся в каналах межзеренного пространства в осадке, а так же и к самим твердым частицам, если последние имеют поры переходного размера.

К микропористым минералам относятся цеолиты, которые представляют собой водные алюмосиликаты катионов элементов I и II групп Периодической системы Менделеева. Цеолиты применяются как адсорбенты, а также в качестве молекулярных сит для селективного извлечения органических молекул в зависимости от их размера. Сульфидные минералы можно отнести к макропористым минералам.

### **Вопросы для самоконтроля бакалавров**

1. Назовите основные процессы обезвоживания. Как изменяется содержание твердого между стадиями обезвоживания?
2. Назовите основные виды связи воды с твердым материалом.
3. Какие виды воды удаляются при обезвоживании?
4. С какими явлениями и параметрами твердых тел связана их влагоудерживающая способность?
5. К каким по пористости минералам относятся сульфиды?

### **Вопросы для самоконтроля магистров и специалистов**

1. В чем отличие процессов разделения твердой и жидкой фаз – при обезвоживании и при очистке сточных вод?
2. Перечислите основные процессы обезвоживания и движущие силы.
3. Определите взаимосвязь между дисперсностью твердой фазы и основными процессами обезвоживаниями.
4. Каким образом связаны влагоудерживающая способность твердых тел и выбор процессов обезвоживания?

## 2. ОБЕЗВОЖИВАНИЕ КУСКОВОГО МАТЕРИАЛА ДРЕНИРОВАНИЕМ

### 2.1. Гидродинамика течения жидкости под влиянием гравитационной силы

*Дренаживанием* называют операцию обезвоживания за счет стекания жидкости под влиянием силы тяжести по капиллярам осадка. Такой процесс происходит эффективно, когда размер частиц осадка, как правило, более 2 мм.

Количество вытекающей по капилляру жидкости определяется режимом течения. Режимы течения бывают трех типов: ламинарное, турбулентное и промежуточное.

Характер течения жидкости в капиллярах осадка можно определить по числу Рейнольдса:

$$Re = \frac{w_{ж} D}{\eta},$$

где  $D$  – диаметр капилляра, см;

$w_{ж}$  – скорость течения воды, см/с;

$\eta$  – кинематическая вязкость (для воды 0,01 см<sup>2</sup>/с).

При  $Re > 20 \dots 50$  ламинарный режим переходит в турбулентный.

Размер пор в осадке оценивают по диаметру частиц. Задаваясь формой и упаковкой частиц в осадке, рассчитывают радиус межзеренного пространства.

При плотной укладке шарообразных зерен эффективный радиус межзеренных каналов ( $R_{эф}$ ) составляет  $R_{эф} = 0,31r_{зер}$ , где  $r_{зер}$  – радиус зерна.

При других, менее плотных упаковках, которые чаще встречаются для сыпучих материалов,  $R_{эф}$  равно

$$R_{эф} = \frac{R_{max} + R_{min}}{2}.$$

При этом для октаэдрической упаковки с числом «соседей», равным шести:

плотная упаковка  $R_{\max} = 0,414 \frac{\bar{d}_{\text{зер}}}{2}$ ;

менее плотная упаковка  $R_{\min} = 1,5 \frac{\bar{d}_{\text{зер}}}{2}$ ,

где  $\bar{d}_{\text{зер}}$  – средний размер зерна, см.

По данным опытов, в каждом сечении осадка имеется распределение размеров каналов. При этом для осадков с полидисперсными зернами  $D_{\min}$  близок к нулю.

Удельный расход жидкости определяется также величиной гидравлического уклона  $i$  (перепад давления по длине осадка), который является движущей силой процесса. Эта величина рассчитывается по формуле

$$i = \frac{h\rho + L\rho}{\rho L} = \frac{H}{L}, \quad (2.1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$h$  и  $L$  – высота уровня воды над осадком и осадка соответственно, м;

$H = h + L$  – общая высота воды и осадка, м.

Как видно будет из расчета числа Рейнольдса, при дренировании чаще всего наблюдается переходный режим течения жидкости по капиллярам осадка. Скорость вытекания жидкости для переходного режима определяется по формуле

$$w_{\text{ж}} = \frac{\frac{\varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^2} g D^2 i}{4\eta(A - 15\sqrt{B}) + \sqrt{2B\left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)^3 g D^3 i}}, \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon$  – порозность осадка;

$g$  – ускорение силы тяжести (981 см/с<sup>2</sup>);

$D$  – средний диаметр межзеренных каналов, см;

$i$  – гидравлический уклон;

$\eta$  – кинематическая вязкость, см<sup>2</sup>/с;

$A$  и  $B$  – коэффициенты, зависящие от формы зерен и незначительно – от природы материала:

Форма зерна .....	$A$	$B$
Округлые .....	50	0,75
Обычные (смешанные) .....	75	1,05
Остроугольные .....	105	1,30

При ламинарном течении уравнение (2.2) переходит в закон Дарси (2.4). При этом

$$i \leq \frac{1800\eta^2}{\left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)^3 gD^3}, \quad (2.3)$$

$$w_{\text{ж}} = \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)^2} \frac{gD^2 i}{4A\eta}, \text{ т.е. } w_{\text{ж}} = K_{\phi} i, \quad (2.4)$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент сопротивления движению жидкости через осадок.

В условиях, когда вязкость не играет роли ( $\eta = 0$ ), выражение переходит в закон квадратичного сопротивления (инерционная сила  $>$  силы вязкости)

$$w_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{\varepsilon^2}{1-\varepsilon} \frac{gDi}{2B}}, \text{ т.е. } w_{\text{ж}} = K_{\phi} \sqrt{i}.$$

Для того чтобы определить режим течения при дренировании по значению числа Рейнольдса, необходимо посчитать диаметр капилляров в осадке и экспериментально определить скорость течения жидкости. Затем в соответствии с числом Рейнольдса надо выбрать формулу для расчета и проверить ее соответствие экспериментальным данным. Приведем пример расчета:

$$\bar{d}_{\text{зер}} = 4 \text{ мм, или } 0,4 \text{ см};$$

$$\bar{D}_{\text{кап}} = 2 \cdot 0,31 \cdot \frac{0,4}{2} = 0,124 \text{ см.}$$

Определенная экспериментально средняя скорость движения жидкости по капиллярам осадка составила

$$w_{\text{ж.ср}} = 1,5 \text{ см/с или } Re = \frac{1,5 \cdot 0,124}{0,01} = 18,6,$$

т.е. наиболее вероятен переходный режим движения. Поэтому удельный расход жидкости следует рассчитывать по формуле (2.2) для переходного режима.

Режим течения можно также оценить по выражению (2.3). Обычно гидравлический уклон  $i$  при дренировании равен 2...3. Пористость, или порозность, можно оценить по плотности  $\rho$  и насыпной плотности  $\rho_0$ :

$$\varepsilon = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} = \frac{2,3 - 1,9}{2,3} = \frac{0,4}{2,3} \approx 0,174;$$

$$i = \frac{1800 \cdot 0,01^2}{\left(\frac{0,174}{1 - 0,174}\right)^3 \cdot 981 \cdot 0,124^3} = 10,3.$$

Поскольку  $i > 10,3$ , режим вытекания жидкости из кускового материала со средним диаметром зерна 0,4 см можно считать переходным. Следовательно, определение режима течения по межзеренным каналам осадка по значению  $Re$  и по формуле (2.3) дает результаты одного порядка.

Чтобы рассчитать значение критерия Рейнольдса, нужно знать средний диаметр каналов в осадке и скорость течения жидкости по ним, а для расчетов режима течения по формуле (2.3) нужно иметь значения среднего диаметра каналов в осадке и его пористость (или плотность осадка и насыпную плотность сухого осадка).

Необходимо отметить, что турбулентный режим течения при дренировании маловероятен. Вытекание воды из осадка, состоящего из кускового материала, на самом деле будет происходить по двум режимам: в начале – при переходном и в конце – при ламинарном, так как значение гидравлического уклона по мере обезвоживания осадка будет уменьшаться.

Поэтому на практике существует оптимальное время обезвоживания, после которого скорость дренирования резко падает.

## 2.2. Оборудование для дренирования. Схемы обезвоживания кускового материала

### Оборудование для дренирования

Обезвоживание кускового материала за счет вытекания жидкости под влиянием гравитационной силы производят в ковшовых элеваторах, на грохотах, в бункерах и на дренажных складах.

*Ковшовые элеваторы* обезвоживают в процессе транспортировки продуктов обогащения. При этом по мере подъема материала в ковше с пористым днищем из осадка вытекает вода. Они обычно устанавливаются при отсадочных машинах, моечных желобах, при зумпфах насосов, в которые направляется обезвоживаемый продукт. Скорость движения ковшовой ленты принимают при обезвоживании крупных классов 0,25...0,27 м/с, мелких классов – 0,15...0,17 м/с.

Длина элеватора должна быть такой, чтобы время пребывания продукта в ковше от момента зачерпывания до момента выгрузки составляло для крупных классов не менее 17...18 с, а для мелких – 27...29 с.

Устройство элеватора достаточно простое (рис. 2.1). Ковши прикреплены к бесконечной ленте, которая приводится в движение посредством звездочки. У нижней звездочки ковши зачерпывают пульпу, а на верхней – выгружают посредством опрокидывания в желоб. Ковши расположены так, чтобы вода, вытекающая из верхнего ковша, не попадала в нижний.

Элеваторы бывают с разомкнутыми и сомкнутыми ковшами. Кусковой материал обычно обезвоживается в элеваторах до влажности 10...20%. Применяются элеваторы при обогащении марганцевых руд и угля.

Производительность элеваторов с разомкнутыми ковшами можно определить по формуле (т/ч)

$$Q = 1,8 \frac{V}{a} v \rho_{\text{тв}} \psi, \quad (2.5)$$

где  $V$  – объем ковша, л;

$a$  – шаг цепи, м;

$v$  – скорость движения цепи, м/с;

$\rho_{\text{тв}}$  – плотность обезвоживаемого продукта, т/м<sup>3</sup>;

$\psi$  – коэффициент заполнения ковшей.

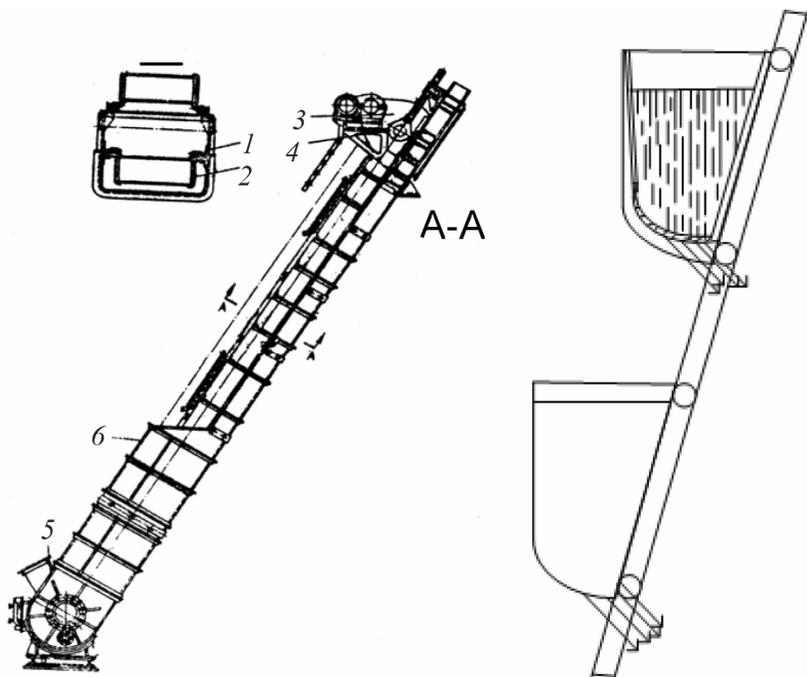


Рис. 2.1. Ковшовый обезвоживающий элеватор с ковшом с двойным дном, предотвращающим попадание воды в нижние ковши:

1 – ковшовая лента; 2 – ковши; 3 – приводная головка;  
4 – натяжное устройство; 5 – загрузочный башмак; 6 – кожух

Обезвоживанию на грохотах может подвергаться более тонкий продукт, чем на элеваторах, а именно – до 0,5...1 мм.

При грохочении на неподвижных дуговых грохотах за счет движения питания по окружности дополнительно к силе тяжести развивается центробежная сила, что способствует более быстрому удалению воды из осадка (рис. 2.2).

На движущихся грохотах более быстрому удалению влаги по сравнению с дренированием способствует сила вибраций. Сито на обезвоживающих грохотах изготавливают в виде щелей с трапецидальным сечением.

В дуговых ситах трапецидальные нержавеющие колосники уложены перпендикулярно потоку обезвоживаемого материала. Удельная нагрузка на дуговое сито порядка  $q = 200...240 \text{ м}^3/\text{м}^2$ .

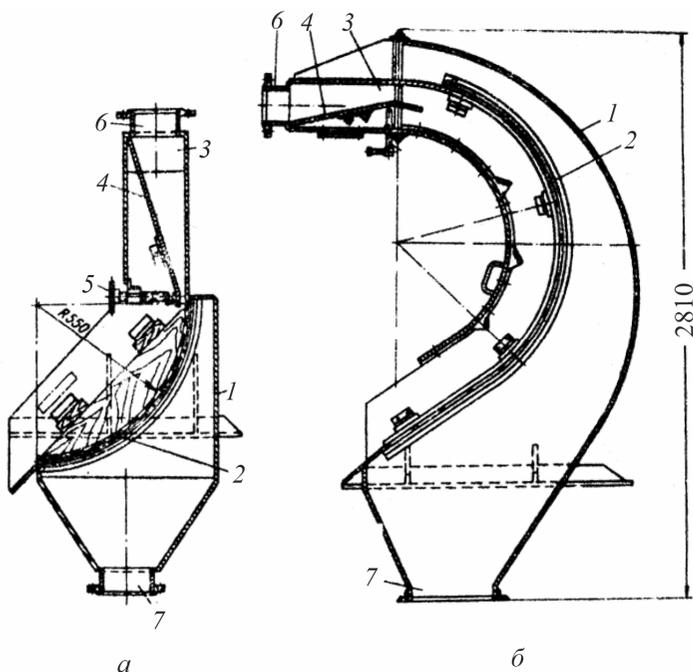


Рис. 2.2. Сита дуговые: *а* – сито СД-1; *б* – сито СДО-3:  
 1 – корпус; 2 – щелевидное сито; 3 – приемная коробка;  
 4 – прижимной щит; 5 – винты, регулирующие положение  
 прижимного щита; 6, 7 – входной и разгрузочный патрубки

Для обезвоживания применяются также и подвижные сита – быстроходные плоскокачающиеся, вибрационные и резонансные грохоты.

В марках грохотов, предназначенных для обезвоживания, обязательно ставится буква «О» (например, БКГО-11А означает быстрокачающийся грохот для обезвоживания); вибрационные типа ТФО-DW; резонансные ГРО-1А и т.д. На рис. 2.3 приведена принципиальная схема процесса обезвоживания на грохоте, совмещенного с промывкой.

Влажность продуктов после грохотов для крупных классов более 2 мм может снижаться до 6...9 %, для мелкого материала (например, для углей крупностью +0,5 мм влажность составляет от 17 до 27 %). КПД обезвоживания достигает 40...45 %.

Процесс обезвоживания в бункерах – циклический. Бункер загружают мокрым материалом. Вода дренирует через слой осадка и через ложное дно и удаляется. После 6...20 ч отстаивания ложное дно выдвигается и обезвоженный материал выгружается.

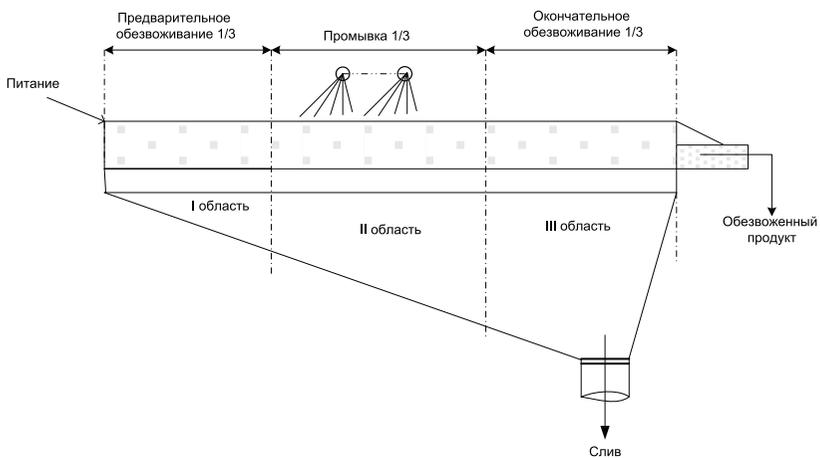


Рис. 2.3. Принципиальная схема процесса обезвоживания на грохоте, совмещенного с промывкой

КПД обезвоживания в бункерах меньше, чем на грохотах, и обычно не превышает 40 %. Например, при обезвоживании в бункере материала гравитационной крупности влажность снижется от 18 до 10 % или от 10 до 6,3 %. На рис. 2.4 приведена ячейка обезвоживающего бункера.

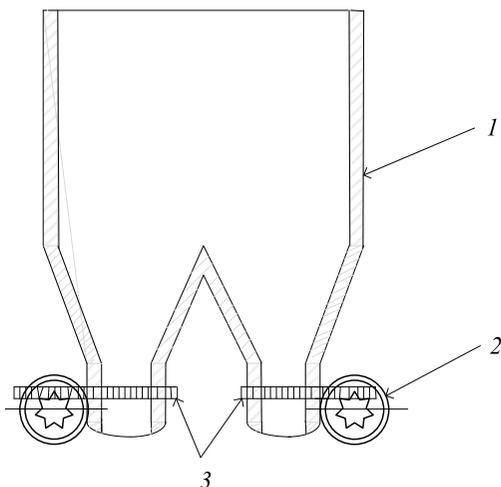


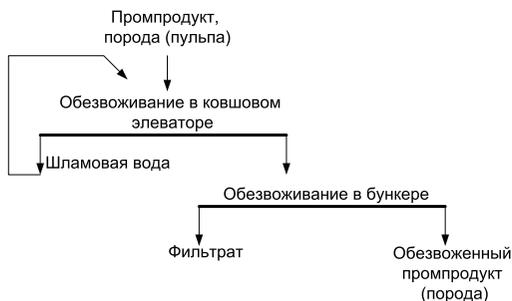
Рис. 2.4. Ячейка обезвоживающего бункера:  
 1 – призматическая часть ячейки; 2 – затвор; 3 – ложное днище

По аналогичному принципу устроены дренажные склады, но это большие сооружения в виде отдельного здания. Пол на складе устроен в виде дренажной системы – канав и крупного щебня. Выгрузка обезвоживаемого материала, как правило, производится грейферными кранами. Обезвоживают на дренажных складах материал, который прошел первую стадию обезвоживания (в сгустителе – мелкий, на грохоте – крупный).

После 10 или 34 ч обезвоживания на складе влажность материала снижается с 15 до 10...6 %.



*a*



*б*

Рис. 2.5. Схемы обезвоживания кусковых и зернистых продуктов обогащения дренированием: *a* – обезвоживание концентрата; *б* – обезвоживание промпродукта и породы