

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего профессионального образования**  
**«Кузбасский государственный технический университет**  
**имени Т.Ф. Горбачева»**

**Кафедра обогащения полезных ископаемых**

**Составитель**  
**Л. А. Суслина**

## **ФЛОТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБОГАЩЕНИЯ**

### **Методические указания к самостоятельной работе**

**Рекомендованы учебно-методической комиссией**  
**учебно-методической комиссии специальности 21.05.04 Горное дело,**  
**специализации 21.05.04.06 Обогащение полезных ископаемых,**  
**в качестве электронного издания**  
**для использования в учебном процессе**

**Кемерово 2025**

## Рецензенты

Рецензент: Бобровникова А. А., кандидат химических наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых, председатель учебно-методической комиссии специальности 21.05.04 Горное дело, специализации 21.05.04.06 Обогащение полезных ископаемых

## Суслина Людмила, Алексеевна

**Флотационные процессы обогащения** : методические указания к самостоятельной работе для студентов специальности 21.05.04 Горное дело, специализации 21.05.04.06 Обогащение полезных ископаемых, всех форм обучения / Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева ; кафедра обогащения полезных ископаемых ; составитель: Л. А. Суслина. – Кемерово : КузГТУ, 2025. – 1 файл (1292 Кб). – Текст : электронный.

В издании изложены ссылки на литературу, содержащую теоретические основы изучаемых тем, краткий курс лекций, вопросы для самоподготовки, вопросы для подготовки к итоговому тестированию и экзамену.

Материал, представленный в методических указаниях, разработан для упрощения задачи усвоения студентами учебного материала.

Методические указания к самостоятельной работе «Флотационные процессы обогащения» по содержанию соответствуют рабочей программе дисциплины и ФГОС.

© Кузбасский государственный  
технический университет имени  
Т. Ф. Горбачева, 2025

© Суслина Л. А., составление,  
2025

## **Содержание самостоятельной работы**

Самостоятельная работа подразумевает получение новых знаний по изучаемой дисциплине. Всякое новое знание базируется на ранее изученном материале, поэтому перед лабораторными занятиями, в процессе курсового проектирования необходимо изучать лекционный материал, учебную литературу. Ниже представлены краткий курс лекций, домашние задания и вопросы для подготовки.

Рекомендуемые виды самостоятельной работы:

1. Работа с конспектом лекции, учебником, учебным пособием, нормативными документами, материалами электронного ресурса и сети Интернет:

- конспектирование;
- составление плана и тезисов ответа;
- аналитическая обработка текста (аннотирование, редактирование, конспект-анализ);
- решение задач и упражнений по образцу;

2. Получение консультативной помощи специалистов.

Формы контроля самостоятельной работы определяются преподавателем:

- собеседование (на практическом занятии и в часы консультаций);
- контрольная работа (на практическом занятии);
- проверка индивидуальных заданий (на практическом занятии);
- компьютерное тестирование (альтернативно зачету по теме);
- устный опрос (на практическом занятии, на лекции, альтернативно зачету по теме).

## **Краткое содержание курса**

### ***Введение***

Флотация – способ разделения минералов, при которых одни минералы – гидрофобные закрепляются на межфазовой поверхности, а другие – гидрофильные такой способностью не обладают. Во флотации межфазовой границей, к которой прикрепляются минералы, обычно являются: вода–воздух, масло–вода,

вода–газ. Природную гидрофобность или гидрофильность можно усилить или ослабить с помощью реагентов.

Универсальность метода заключается в том, что при помощи реагентов можно менять состояние поверхности частиц, т. е. усиливать или уменьшать гидрофильность или гидрофобность поверхности, гидрофобизировать гидрофильную поверхность или гидрофилизировать гидрофобную.

Флотационному методу обогащения подвергаются частицы, как правило, имеющие размеры менее 0,5 мм, т. е. шламы.

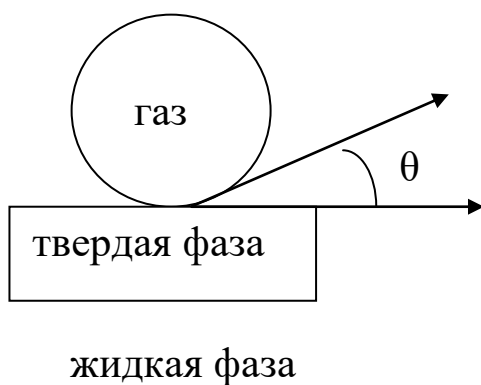
Существует большое разнообразие флотационных процессов: пенная флотация, плёночная, масляная флотация, масляная грануляция и др. Пленочной флотацией называется процесс, при котором гидрофобные частицы, попадая на поверхность движущегося потока воды, остаются на ней, образуя пленку, а гидрофильные частицы тонут. Пленочная флотация используется в процессе флотогравитации при доводке гравитационных концентратов. Масляной флотацией называется процесс, при котором гидрофобные частицы прилипают к каплям масла в пульпе и всплывают наверх, а гидрофильные частицы остаются взвешенными в пульпе. Разделение минеральных частиц может осуществляться также при помощи гидрофобной твердой поверхности (флотация твердой стенкой) или твердой поверхности, покрытой слоем гидрофобной вязкой жидкости (обогащение на жировой поверхности). К таким поверхностям, помещенным в пульпу, избирательно прилипают гидрофобные частицы. Флотация на жировой поверхности используется при обогащении алмазов. В промышленности широко применяется пенная флотация. Известны разновидности пенной флотации: флотация кипячением, химическая флотация (например, если порода содержит кальцит, то добавляя серную кислоту можно флотировать гидрофобные частицы на образующихся пузырьках углекислого газа), вакуумная флотация, флотация под давлением, электрофлотация (получение пузырьков электролизом воды) и другие виды. Традиционно на преобладающем большинстве обогатительных фабрик применяется пенная флотация минералов на пузырьках воздуха. Пенной флотацией называется процесс, при котором гидрофобные частицы прилипают к вводимым в пульпу пузырькам воздуха или газа и поднимаются с ними вверх, образуя пену. Гидрофильные частицы остаются в пульпе во взвешенном состоянии.

### Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается процесс флотации?
2. Чем отличаются гидрофобные минералы от гидрофильных?
3. Какие классы крупности частиц руды подвергаются обогащению флотационными методами?
4. Расскажите, какие вы знаете типы флотационных процессов?
5. Что представляет собой пенная флотация минералов на пузырьках воздуха?
6. В чем заключается актуальность применения флотационных методов обогащения, например, для полиметаллических, тонковкрапленных руд, угольных шламов и т. д.?

### ***2. Теоретические основы флотационного процесса***

Существовало много различных гипотез элементарного акта флотации. Первая заключалась в том, что кислород воздуха обладает избирательной адсорбцией при закреплении сульфидов на пузырьках воздуха. Это явление объясняли сродством кислорода воздуха с серой. Оказалось, это не так, т. к. сульфиды прикрепляются так же и к пузырькам инертного газа. Второй гипотезой было, то, что частицы и пузырек закрепляются при флотации за счет электростатических сил. Считалось, что гидрофобные частицы и пузырёк воздуха имеют разные заряды поверхности и прикрепляются друг к другу под действием кулоновских сил. Но когда измерили потенциал поверхности пузырька и сульфидных минералов, выяснили, что в основном заряд поверхности имеет отрицательный знак, как у пузырька, так и у гидрофобных частиц, поэтому кулоновские силы скорее мешают прикрепляться частицам к поверхности пузырька, чем помогают. Третья гипотеза – гипотеза смачивания. Оказалось, что причина прикрепления гидрофобной частицы и пузырька заключалась в наличии свободной поверхностной энергии на границе раздела фаз между частицей и пузырьком и, как следствие, силах поверхностного натяжения. Трактовать гипотезу можно как с силовых, так и термодинамических позиций. Термодинамическая гипотеза опирается на второй закон термодинамики. Согласно ему, закрепление частицы на поверхности раздела фаз возможно в случае, если при



этом происходит уменьшение свободной поверхностной энергии системы.

Линия соприкосновения трёх фаз называется периметром смачивания. Смачиваемость характеризуется величиной краевого угла смачивания

поверхности –  $\theta$ . Это угол, образованный поверхностью раздела двух фаз с поверхностью третьей фазы. Краевой угол принято измерять со стороны жидкой фазы.

$\theta$  – равновесный угол смачивания на идеально гладкой поверхности. В реальной жизни его искажает явление, которое называется гистерезисом смачивания. Гистерезис смачивания – задержка восстановления равновесного значения краевого угла. Тормозящее действие гистерезиса смачивания можно сравнить с трением, также препятствующим достижению истинного равновесия. Гистерезисная сила всегда направлена в сторону противоположную направлению относительного движения. При закреплении частицы на поверхности раздела вода – воздух площадь контакта начинает увеличиваться (наступление газообразной фазы на жидкую). Сила гистерезиса будет противодействовать этому процессу. При попытке отрыва уменьшается площадь, ограниченная периметром смачивания (наступление жидкой фазы на газообразную). Сила гистерезиса будет препятствовать уменьшению площади, а, следовательно, отрыву пузырька от частицы. Здесь, гистерезис играет положительную роль, способствуя устойчивости флотационного комплекса.

Частица удерживается на пузырьке флотационной силой

$$F_{\phi} = \pi a \sigma_{г-ж} \sin \theta \quad ,$$

которая определяется силой поверхностного натяжения жидкость-газ –  $\sigma_{г-ж}$ , краевым углом смачивания  $\theta$  и периметром смачивания –  $\pi a$ . Чем гидрофобнее поверхность частицы, тем больше краевой угол, а значит больше флотационная сила, тем прочнее удерживается частица на поверхности раздела фаз.

Необходимо изучить характеристику раздела фаз, участвующих в элементарном акте флотации; роль двойного электрического и гидратных слоев на границе раздела фаз в избирательном

закреплении минералов к пузырьку; изменение энергии прослая воды между пузырьком и частицей при элементарном акте флотации; явления «сухой» и «мокрой» флотации. Ознакомится с понятием «угол формы» и влиянием формы частиц на флотируемость, проанализировать уравнение Фрумкина – Кабанова, как условие флотационного равновесия.

### Вопросы для самопроверки

1. Какие гипотезы элементарного акта флотации существовали в истории развития флотации?
2. В чем заключается гипотеза смачивания?
3. Дайте определение краевому углу смачивания.
4. Со стороны какой из фаз принято измерять краевой угол?
5. Что такое гистерезисная сила?
6. Какую роль играет гистерезис при отрыве частицы от пузырька и при закреплении ее?
7. Что представляет собой флотационная сила, и от каких физических величин она зависит?
8. В чем заключается роль двойного электрического и гидратных слоев на границе раздела фаз при закреплении минералов к пузырьку?
9. Как изменяется энергия прослая воды между пузырьком и частицей при элементарном акте флотации.
10. Объясните понятия «сухая» и «мокрая» флотации.
11. Что такое угол формы и какое значение имеет при флотации?
12. Напишите условие флотационного равновесия.

### **3. Флотационные реагенты**

В этой главе необходимо уделить внимание следующим вопросам. Ознакомиться с назначением и классификацией флотационных реагентов. Особое внимание уделить реагентам-собирателям: изучить их классификацию, строение молекул, механизмы действия сульфгидрильных и оксигидрильных собирателей, катионных, аполярных собирателей. Ознакомиться с классификацией, строением молекул и механизмами действия реагентов-модификаторов поверхности: депрессоров, активаторов, регуляторов среды. Особое внимание уделить механизмам действия

таких важных реагентов-депрессоров как цианиды. Ознакомиться с рядом Каковского. Изучить классификацию, строение молекул, механизмы действия реагентов пенообразователей, а, также свойства флотационных пен.

Большинство реагентов работают в ионной форме (диссоциированные на ионы). Чтобы закрепиться на поверхности минерала, они должны образовывать с ионами поверхности трудно растворимые соединения. Следовательно, для того, чтобы уменьшить расход реагентов, необходимо повысить растворимость собирателя подбором типа и расхода регулятора среды. Подбор собирателей производить, ориентируясь на произведение растворимости соединения, которое образуется при химической реакции собирателя с ионами поверхности минерала.

Из класса оксигидрильных собирателей наиболее важными являются карбоновые кислоты и их мыла (соли). Карбоновые (жирные) кислоты – слабые, следовательно, подвергаются гидролизу, в кислых и слабокислых средах. Продукты гидролиза не обладают флотационной активностью, поэтому только в щелочных пульпах можно получить высокую концентрацию анионов кислоты. В кислых пульпах основное количество этих реагентов находится в нерастворенном виде. Собирающие способности жирных кислот зависят от строения углеводородной цепи. При небольшом количестве углерода в цепи собирающие способности реагента меньше, а при больших количествах углерода выше. Разветвление цепи приводит к уменьшению собирающей способности карбоновых кислот. Олеиновая кислота – наиболее яркий представитель жирных кислот, замерзает при +14 °С. Следовательно, при низких температурах, флотационная активность резко падает. Для повышения активности жирных кислот при низких температурах пульпы применяют, например, органические растворители (керосин, спирт), эмульгаторы (алкилсульфаты, сульфонол) или подогревают пульпу. Собиратели – жирные кислоты используют для флотации окисленных минералов, таких как барит, шеелит, церуссит, англезит и др.

Из класса собирателей очень важными являются сульфгидрильные собиратели. Наиболее яркие представители этого класса – ксантогенаты. Ксантогенаты применяются для



флотации полиметаллических руд (сульфидных) руд цветных металлов. Флотируемость сульфидных металлов ксантогенатами, зависит от их растворимости. Лучше флотируются те сульфиды, с металлами которых ион ксантогената образует менее растворимую соль. Флотируемость сульфида возрастает от сфалерита до галенита далее к ковеллину (табл. 1).

Таблица 1

Увеличение флотируемости сульфидов металлов в зависимости от растворимости ксантогенатов соответствующих металлов, образующих пленку собирателя на поверхности сульфидов

Этиловые ксантогенаты	Произведение растворимости.
$\text{Bi}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OCS}_2)_3$	$10^{-39}$
$\text{Hg}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OCS}_2)_2$	$2,5 \times 10^{-30}$
$\text{Fe}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OCS}_2)_3$	$10^{-21}$
$\text{Cu C}_2\text{H}_5\text{OCS}_2$	$3,5 \times 10^{-20}$
$\text{AgC}_2\text{H}_5\text{OCS}_2$	$4,4 \times 10^{-19}$
$\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OCS}_2)_2$	$1,7 \times 10^{-17}$
$\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OCS}_2)_2$	$4,9 \times 10^{-9}$
$\text{Fe}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OCS}_2)_2$	$8 \times 10^{-8}$

По стрелке: флотируемость сульфидов металлов возрастает, т. к. растворимость ксантогенатов металлов на поверхности сульфидов падает

Собирательные свойства ксантогенатов также усиливаются при увеличении длины углеводородного радикала (табл. 2).

Чем длиннее углеводородная цепь, тем эффективнее флотация, но хуже растворимость. Из ксантогенатов наиболее часто применяют ксантогенаты калия. Они более устойчивые при хранении. На практике используются в виде 10%-го раствора (чем выше концентрация, тем он устойчивей). Ксантогенаты калия – соли относительно слабой кислоты и сильного основания, следовательно, они подвергаются гидролизу. Продукты гидролиза не обладают собирательными свойствами, поэтому флотацию ксантогенатами необходимо вести в щелочной среде. Ксантогенаты особенно неустойчивы в кислых средах. Скорость действия очень велика до 1 минуты, поэтому для взаимодействия ксантогената с минеральными частицами не нужны контактные чаны. Расход реагентов от 30 до 100 г/т.

Таблица 2

Влияние длины и строения углеводородной цепи на величину краевого угла при насыщенном слое ксантогената на минерале

Ксантогенат	Радикал	Строение углеводородной цепи	$\theta$ (краевой угол)
без собирателя	—	—	0
метиловый	$\text{CH}_3$	Открытая не разветвленная	50
этиловый	$\text{C}_2\text{H}_5$	Открытая не разветвленная	60
пропиловый	$\text{C}_3\text{H}_7$	Открытая не разветвленная	68
бутиловый	$\text{C}_4\text{H}_9$	Открытая не разветвленная	74
изобутиловый	$\text{C}_4\text{H}_9$	Открытая разветвленная	78
изомиловый	$\text{C}_5\text{H}_{11}$	Открытая разветвленная	86
крезиловый	$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4$	замкнутая	72
циклогексиловый	$\text{C}_6\text{H}_{11}$	замкнутая	75

Стрелка указывает направление повышения флотуемости минералов при применении соответствующих ксантогенатов.

Механизм действия ксантогенатов хемосорбционный. По гипотезе Шведова замещение иона сульфида  $\text{S}^{2-}$  на ион ксантогената, например, на галените невозможно, т. к. произведение растворимости галенита

$$[\text{Pb}^{2+}][\text{S}^{2-}] = 3,4 \cdot 10^{-28},$$

а произведение растворимости, например, этилового ксантогената свинца

$$[\text{Pb}^{2+}][\text{X}^-]^2 = 1,7 \cdot 10^{-17},$$

т. е. ксантогенаты свинца гораздо более растворимые соединения, и поэтому ион  $\text{S}^{2-}$  не может замещаться на ион ксантогената  $\text{X}^-$ , ввиду не протекания реакции обмена между этими соединениями. Согласно гипотезе Шведова, на поверхности сульфида, образуются сульфидоокисленные соединения, которые прочно связаны с кристаллической решёткой сульфидов. Именно кислородосодержащие анионы  $\text{SO}_4^{2-}$  вытесняются ксантогенатами, с образованием менее растворимых соединений. Однако чрезмерное окисление сульфидов вредно, т. к. при этом ионы ксантогената расходуются на весь окисленный слой, это приводит к большому расходу ксантогенатов.

Следовательно, небольшое окисление сульфидов необходимо для флотации ксантогенатами, чрезмерное окисление приводит к большому расходу собирателя, так как он при этом тратится на химическую реакцию с плёнкой окисленного соединения. Взаимодействие сульфгидрильных собирателей с сульфидо-окисленным слоем представляет собой обменную хемосорбционную реакцию с образованием менее растворимого соединения.

Сильноокисленные минералы обрабатывают сульфидами щелочных металлов или щелочноземельных, например, сульфидом натрия или кальция, тогда часть сульфатных ионов замещается сульфидными, что приводит к меньшему расходу собирателя.

Собиратели типа ксантогенатов или олеатов на поверхности минерала распределяются неравномерно, образуя островные покрытия. Экспериментально установлено, что для флотации минералов ксантогенатами достаточно покрыть поверхность минерала на 15–20 % от условного монослоя. Превышение более, чем на 30–40 % не увеличивает гидрофобность поверхности, а при больших концентрациях как ксантогенатов так и других анионных коллекторов (жирных кислот и их солей, например, олеатов), происходит обратное явление – гидрофилизация поверхности – перемасливание, что приводит к ухудшению флотации минералов.

Реагенты аэрофлоты также относятся к сульфгидрильным собирателям. Это производные дитиофосфорной кислоты. Соли дитиофосфорной кислоты – сухие аэрофлоты. Они слабее ксантогенатов, как собиратели, но устойчивы к кислой среде (не окисляются кислородом). Используются для флотации цветных металлов, особенно меди. Расход 50–150 г/т.

Катионные собиратели – органические производные аммиака (амины). Имеют свойства слабых оснований, следовательно, в кислой среде их растворимость увеличивается. Если в радикале 6–8 углеродов, то амины нерастворимы в воде и поэтому используют их соли. Катионные собиратели легко флотируют кварц, полевые, шпаты, слюды карбонаты, фосфаты, сульфиды.

Неионогенные собиратели – основные реагенты при флотации природно гидрофобных минералов (уголь, графит, сера, молибденит и др.). В качестве дополнительных собирателей их

применяют при флотации самых разнообразных минералов (вводят в дополнение к ионогенным собирателям). В качестве собирателя для флотации угольных шламов лучше всего подходит керосин. Промышленные испытания показывают преимущества дробного способа подачи реагента и подачи его в виде эмульсии (табл. 3).

Таблица 3

Результаты исследования влияния подачи керосина в эмульсионном виде на флотацию угольных шламов

Продукты флотации	Без эмульгирования		В виде эмульсий	
	Выход, %	Зольность, %	Выход, %	Зольность, %
1	15,3	6,18	23,1	5,6
2	12	6,03	23,6	5,7
3	21,4	6,83	21,6	7,02
4	17,2	6,78	14,4	8,49
5	20,6	10,5	6,7	11,3
6	24,6	12,5	2,8	16,5
Итого	88,6	7,85	89,6	7,1

Из таблицы можно сделать вывод, что подача реагента в виде эмульсий существенно улучшает показатели.

#### Вопросы для самопроверки

1. Опишите механизм действия ионогенных реагентов.
2. Что представляют собой оксигидрильные собиратели? Каковы условия их работы.
3. Что представляют собой сульфгидрильные собиратели? В какой среде они активно действуют?
4. Опишите механизм действия ксантогенатов по гипотезе Шведова.
5. Что такое перемасливание? Объясните это явление.
6. Что представляют собой реагенты аэрофлоты? В какой среде они активно действуют?
7. Катионные собиратели. В какой среде они активно работают? Какие минералы можно флотировать с их применением?

8. Аполярный собиратель. В чем заключается его особенность? Опишите механизм действия. Какие минералы флотируют с его применением?

#### ***4. Технология флотационного процесса***

На результат флотации влияет ряд условий: крупность зерен, плотность пульпы, реагентный режим, аэрация и перемешивание пульпы, интенсивность съема пены, дебит и температура пульпы, кинетика флотации, флотационные схемы.

Очень важный фактор при флотации минералов – крупность частиц. Зерна флотируемого минерала должны быть достаточно мелкими для их надежного закрепления на пузырьках и достаточно большими, чтобы преодолеть гидратный слой вокруг флотируемой частицы. Наибольшая крупность флотируемых частиц зависит от гидрофобности минерала, его плотности, формы частиц. Лучше флотируются частицы с высокой естественной гидрофобностью, малой плотностью и плоскими гранями (например, чешуйчатой формы, такие как молибденит, графит). Зерна округлые (например, золото) флотируются хуже.

Очень вредно для флотации переизмельчение руды. Тонкие шламы с размером частиц менее 30 мкм затрудняют флотацию более крупных частиц, т. к. могут неселективно сорбироваться на их поверхности, унося частицу полезного компонента в отходы или породную частицу в концентрат. Обладая большой суммарной поверхностью, тонкие частицы поглощают большое количество реагента. В этом случае, например, для эмульсионных растворов реагентов, необходимо применять дробную подачу, т. к. вероятность встречи «крупной» частицы с каплей реагента в пульпе больше, чем для маленькой частицы.

Плотность пульпы важна при флотации. Она характеризуется либо разбавленностью

$$R = \frac{W}{Q},$$

как отношение веса воды к весу твёрдого вещества, либо содержанием твёрдого

$$\beta = \frac{Q}{Q + W},$$

т. е. отношением веса твёрдого вещества к весу пульпы. Разбавленность и содержание твёрдого связаны между собой

$$\beta = \frac{1}{1 + R}.$$

При флотации невыгодно иметь как слишком плотные, так и слишком разбавленные пульпы. Оптимальное разбавление зависит от крупности и плотности минералов, назначения операции флотации (основная, контрольная, перечистка), от качества флотируемого материала. Например, при большом содержании шлама в руде применяет более разбавленные пульпы. Для повышения качества концентрата в перечистных операциях также применяют разбавленные пульпы. В основных операциях и контрольных для повышения извлечения полезного компонента применяют пульпы более плотные.

На результат флотации большое влияние оказывает реагентный режим: тип реагента, расход реагента, точка подачи, продолжительность контактирования с пульпой в АКП (аппарате кондиционирования пульпы), эмульгирование, а также порционная или дробная подача. Как правило, реагенты добавляются в следующем порядке: сначала регуляторы среды (чаще подаются в мельницу), затем депрессоры, либо вместе с регуляторами среды, либо позже, точки подачи: мельница, классификатор, далее собиратель, вспениватели загружаются последними. Дробная порционная загрузка даёт лучшие результаты, чем единовременная. Эмульгирование аполярных реагентов понижает их расход.

Немаловажным фактором при флотации минералов являются аэрация и перемешивание пульпы. Аэрация – количество воздуха, проходящее за единицу времени через единицу площади поверхности флотационной камеры –  $a$ , [л/м<sup>2</sup>мин]. Аэрация необходима для получения флотационных пузырьков. Часть воздуха, растворяется в пульпе в большей степени в зонах повышенного давления впереди лопаток импеллера. За лопатками импеллера создаются зоны пониженного давления. В этих зонах организуется пересыщенное состояние растворенного воздуха, и он выделяется из пульпы, образуя микропузырьки. Микропузырьки предпочитают сорбироваться на любые поверхности, при этом попадая на кусочки руды, они способствуют флотации,

уменьшая гидратный слой на поверхности руды и коалесцируя с флотационными пузырьками, тем самым закрепляя их на минерале. Образование микропузырьков в области пониженного давления за лопастью импеллера также имеет свою отрицательную сторону т. к. ограничивает скорость вращения импеллера, из-за явления кавитации. Оно заключается в том, что при больших скоростях вращения импеллера начинает образовываться большое количество микропузырьков, которые с большой скоростью соударяются со встречной лопаткой импеллера, при этом производя сильный шум и разрушая импеллер. По этой причине ограничена скорость вращения всех лопастей двигателей в водной среде. Кислород воздуха также проявляет отрицательное действие при окислении кусочков руды.

Для механических машин, чем интенсивней перемешивание, тем лучше аэрация, для пневматических машин перемешивание осуществляется подачей воздуха. Сильное перемешивание, приводит к отрыву пузырьков воздуха от частицы. Слабое перемешивание – к осаждению частиц на дне камеры. Интенсивность перемешивания должна быть такой, чтобы достигалось равномерное распределение частиц по всему объёму камеры.

На флотацию оказывает влияние интенсивность съёма пены. Содержание полезного компонента в пульпе не изменяется по высоте, переходя в пену, увеличивается скачком, далее растёт. Если снимать только верхний слой пены качество продукта возрастает, извлечение падает. При снятии по всей высоте, качество понизится, а извлечение будет высоким, т. е. качеством и извлечением полезного компонента в пенном продукте можно управлять, регулируя процесс снятия пены.

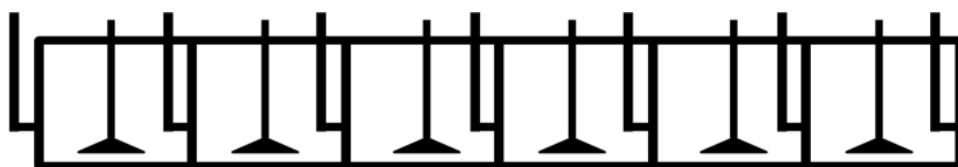
На процесс флотации некоторых минералов оказывает влияние температура пульпы, особенно если применяются собиратели, растворимость которых зависит от температуры.

При температурах воздуха ниже 20 °С теряют свою активность оксигидрильные собиратели на основе олеиновой кислоты. С повышением температуры, улучшается процесс диспергирования труднорастворимых собирателей. Однако подогрев пульпы – дорогостоящий процесс и применяется только тогда, когда можно использовать отходы тепла (сушка и т. д.).

Изучая флотационные машины, необходимо рассмотреть следующие важные вопросы: требования, предъявляемые к флотационным машинам, типы флотационных машин по способу передачи нагрузки из камеры в камеру, по способу аэрации пульпы. Необходимо ознакомиться с принципом действия, достоинствами и недостатками, требованиями к конструкции механических флотационных машин: «Механобр», МФР, флотационные машины угольные – МФУ; пневмомеханических флотационных машин: ФПМ; пневматических флотационных машин: аэролифтных флотационных машин.

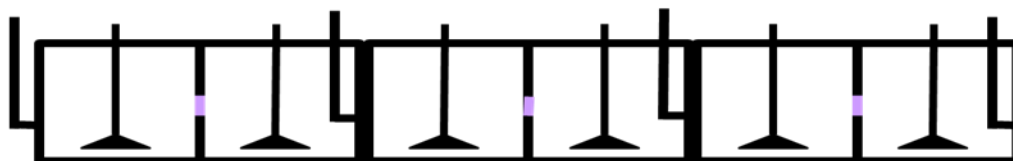
По способу передачи нагрузки из камеры в камеру флотационные машины можно подразделить на три вида: камерные, прямоточные, камерно-прямоточные.

#### Камерные флотационные машины



Камерные флотационные машины состоят из ряда последовательно установленных камер, в каждой из которых имеется импеллер – мешалка особой конструкции и межкамерный карман с шиберным устройством. Каждая камера является всасывающей. Высота пенного порога в каждой камере устанавливается уровнем пульпы, который регулируется шиберным устройством. Это усложняет процесс обслуживания машины, но позволяет в одной машине производить различные операции (основные, перечистные, контрольные).

#### Камерно-прямоточные флотационные машины

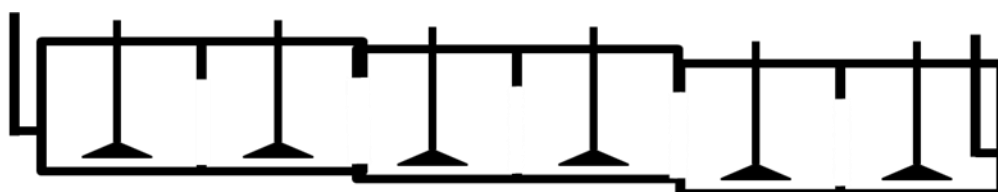


Камерно-прямоточные флотационные машины состоят из ряда камер, в каждой из которых также имеется импеллер, но



межкамерный карман с шиберным устройством установлен в каждой секции, которая состоит обычно из двух-трех камер. Первая камера является всасывающей, вторая и последующие в секции – прямоточные.

### Прямоточные флотационные машины



Прямоточные флотационные машины представляют собой ванну, разделенную на секции с импеллерами. В секциях между камерами практически нет внутренних перегородок. Они имеются только в верхней части ванны для того, чтобы исключить возможный частичный обратный поток пульпы. Пульпа по длине машины перемещается под действием силы тяжести, т. к. машина устанавливается под наклоном. Карман с шиберным устройством установлен в последней камере секции. Это упрощает работы по обслуживанию процесса, т. к. уровень пульпы регулируется только в последней камере. Но и создает проблемы, т. к. из-за наклона машины в каждой секции устанавливается своя высота пенного порога.

По способу подачи воздуха в камеру машины бывают:

- механические, в которых перемешивание и аэрация пульпы осуществляется с помощью импеллера;
- пневмомеханические – перемешивание производится импеллером, аэрация воздуходувками;
- пневматические – перемешивание и аэрация происходит подачей сжатого воздуха, через пористые перегородки или форсунки с большой скоростью.

### **Механические флотационные машины рудные**

Механические флотационные машины широко применяются, т. к. имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами машин: интенсивную аэрацию и перемешивание пульпы, очень хорошие конструктивные характеристики у отечественных машин, возможность работы с широким диапазоном крупности ча-

стиц, отсутствие воздухоудного хозяйства. Но имеются и недостатки в конструкции: сравнительно быстрый износ деталей и из-за этого непостоянство аэрации, а также то, что регулировку зазора между импеллером и надимпеллерным диском приходится проводить практически вслепую.

Каждая секция машины, например, «Механобр» собирается из двух камер: всасывающей и прямоточной.

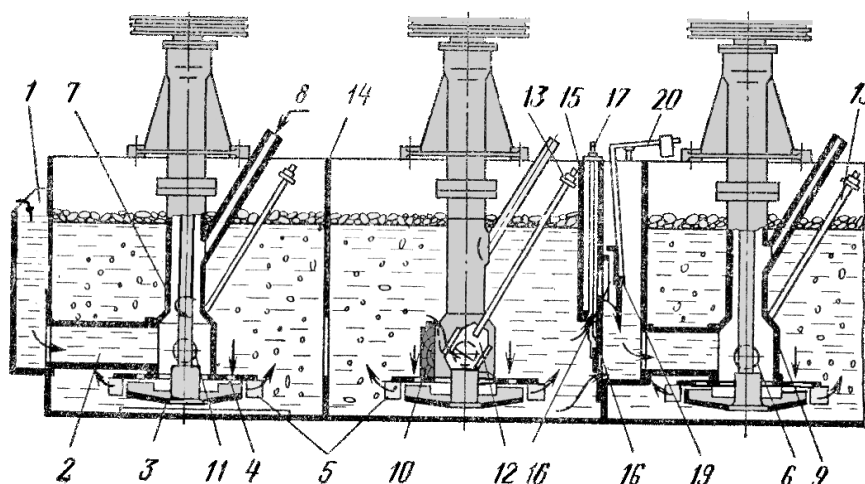


Рис. 1. Механическая флотационная машина «Механобр»:  
 1 – приемный карман; 2 – патрубок; 3 – импеллер; 4 – отверстия в диске; 5 – направляющие лопатки статора; 6 – вал импеллера, 7 – труба импеллера; 8 – патрубок, для подачи воздуха; 9 – надимпеллерный стакан; 10 – пробка; 11 – отверстие; 12 – заслонка; 13 – тяга; 14 – перегородка; 15 – карман; 16 – отверстие для выноса крупных песков; 17 – стержень для регулировки размера отверстия шибером; 18 – отверстие, 19 – крышка; 20 – рычаг с контргрузом

Всасывающая камера имеет карман (1) для подачи исходной пульпы, которая поступает в камеру через патрубок (2) и центральную трубу импеллера (7). Вал импеллера вращается внутри трубы (7), к нижней части трубы крепится надимпеллерный диск – статор (4) с лопатками (5), расположенными под углом 60 градусов к радиусу. При вращении вала (6) между импеллером (3) и надимпеллерным диском образуется зона вакуума, которая заполняется мгновенно поступающей пульпой и воздухом. Воздух из атмосферы поступает в аэратор по патрубку (8) и трубе им-

пеллера (7). Для внутрикамерной циркуляции пульпы надимпеллерный диск имеет круглые отверстия, расположенные по окружности. Кроме того для регулирования внутрикамерного потока в нижней части трубы, называемой надимпеллерным стаканом (9) имеется два отверстия (11), которые служат для внутрикамерной циркуляции пульпы. Одно можно использовать для подвода промпродукта, другое можно закрыть или частично прикрыть заслонкой (12) с помощью штока (13).

К конструкции механических флотационных машин предъявляются определённые требования. Должно соблюдаться определенное соотношение стороны камеры –  $a$  и диаметра импеллера –  $D$ . Если соотношение  $a/D$  меньше чем 1,5, то возникает гидравлический удар, что приводит к шуму и износу деталей машины. Если  $a/D$  больше 1,5, то сложно осуществить полноценное перемешивание и аэрацию, в результате шламуется камера флотационной машины. Также для механических машин есть ограничение по окружной скорости вращения импеллера – не более 9 м/с, так как иначе наступает явление кавитации. На механических флотационных машинах устанавливают успокоительные решётки для обеспечения спокойных условий в верхней зоне камеры, чтобы не допустить отрыва минералов от пузырьков.

### **Флотационные машины угольные**

Флотационные машины угольные комплектуются из трех секций, каждая из которых состоит из двух камер: всасывающей и прямоточной. В отличие от рудных флотационные машины угольные имеют двухсторонние пеногоны из-за большого выхода угольного пенного концентрата.

Флотационные машины угольные отличаются от рудных тем, что импеллер помещён в аэрационную камеру (11) изолирующую зону аэрации и флотации. Это создаёт благоприятные условия для всплывания флотационных комплексов уголь-пузырёк. Верхняя часть аэрационной камеры представляет собой крышку с лопатками, выполняющую роль статора. Воздух при вращении вала импеллеров увлекается в аэрационную камеру через патрубок (8). Пульпа из приемного кармана (3) поступает во флотационную камеру (1), в аэрационную камеру (11) попадает через кольцевые отверстия двумя путями: к нижней части центробежного импеллера (4) и к верхней части. Там пульпа аэриру-

ется и затем отправляется на осевой импеллер (2), равномерно смешивается с частью неаэрированной пульпы и выбрасывается во флотационную камеру через успокоитель с перфорированной поверхностью.

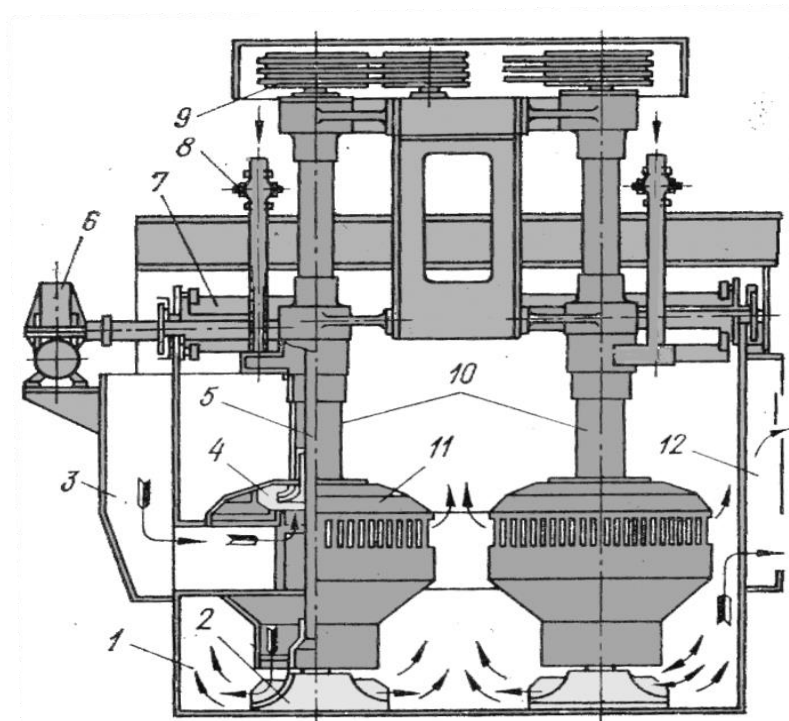


Рис. 2. Флотационная машина угольная МФУ 2-63:

- 1 – корпус; 2 и 4 – центробежный и осевой импеллеры;  
 3 – карман; 5 – вал; 6 – привод; 7 – пеногон; 8 – воздухозаборная труба; 9 – приводной шкив; 10 – блок-импеллеры;  
 11 – аэрационная камера; 12 – переливное устройство

Успокоительная решётка обеспечивает более свободный отвод пульпо-воздушного потока. Часть более насыщенной воздухом пульпы, выбрасывается в верхний слой флотационной камеры через щели в аэрационной камере. Этим достигается аэрация верхних слоёв камеры и стабилизация работы осевого импеллера (2). Таким образом, в машине осуществляется принцип послойной аэрации на уровне центробежного (4) и осевого импеллера (2). Пена удаляется из камер с обеих сторон двухрядным пеногоном (6, 7). Детали флотационной машины (импеллеры, статоры, аэрационные камеры) изготавливают из износостойких сплавов, т. к. они находятся в условиях интенсивного коррозионного и абразивного воздействия. Внутреннюю часть камеры футеруют

плитками из каменного литья, что также предотвращает ее быстрое изнашивание.

Из отечественных механических флотационных машин, обогащающих уголь, большую популярность приобрели флотационные машины МФУ-12 или МФУ-12А.

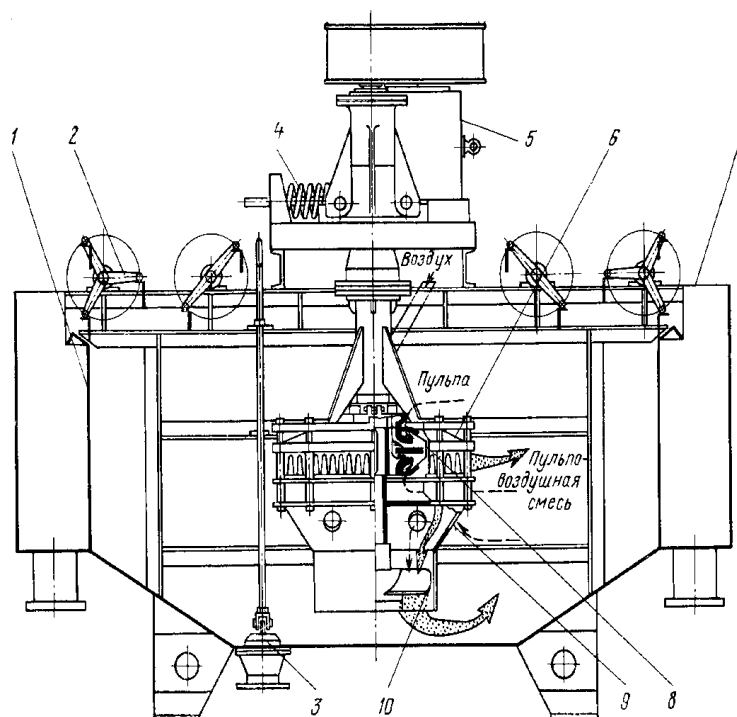


Рис. 3. Флотационная машина МФУ-12:

- 1 – камера; 2 – двухрядный пеногон; 3 – пробка; 4 – пружина натяжного устройства; 5 – электродвигатель; 6 – блок-аэратор; 7 – желоб для флотационного концентрата; 8 – центробежный импеллер; 9 – отверстие для циркуляции суспензии; 10 – осевой импеллер

На рисунке показан поперечный разрез трехкамерной секции. Двухрядный лопастной пеногон (2) необходим для съема минерализованной пены, которая сбрасывается пеногонами в желоба (7) и направляется на фильтрование. Отверстие с пробкой (3) служит для ее освобождения от пульпы на случай профилактического осмотра и ремонта. Натяжное устройство с пружиной (4) фиксирует установку электродвигателя (5), с помощью которого осуществляется вращение вала, в нижней части которого закреплены центробежный (8) и осевой (10) импеллеры.

МФУ-12А представляет собой конструкцию, состоящую из ряда последовательно установленных четырех, шести или восьми камер, приемного, промежуточного и выпускного карманов. Во флотационных машинах МФУ использован принцип двухслойной аэрации и перемешивания пульпы по высоте камеры.

Основные детали машины выполнены из износостойких материалов и сплавов.

Уровень пульпы в камерах машины поддерживается и регулируется шиберными устройствами, установленными в промежуточном и выпускном карманах. Управление приводами может осуществляться либо автоматически с пульта управления, расположенного в любом месте флотационного отделения, либо с кнопочных постов, установленных в непосредственной близости от машины, либо с центрального пульта обогатительной фабрики.



В настоящее время приобрели популярность механические флотационные машины угольные с высоко поднятым импеллером, предназначенные для извлечения тонких угольных частиц 0–0,2(0,5) мм, включая случайно попавшие более крупные частицы размером до 1 мм. Например, флотационные машины Элек-

трогурского металлического завода АО «ЭЛЕМЕТ» с импеллером SFM-170.

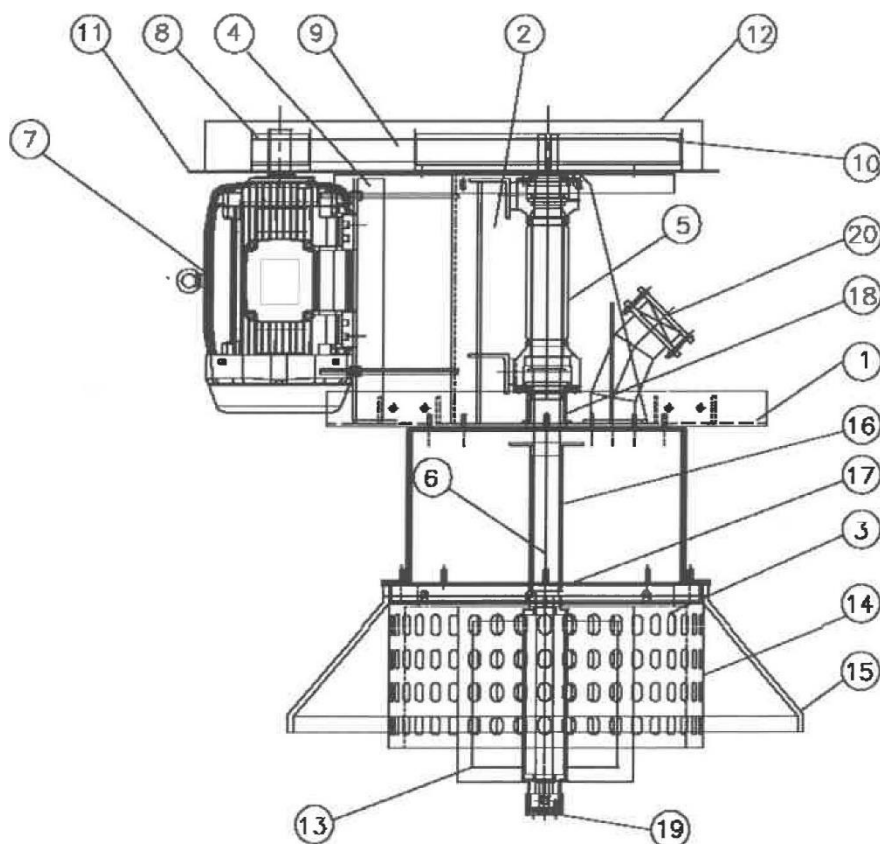


Рис. 4. Описание флотационного механизма импеллера SFM 170

Механизм изготовлен из следующих основных частей:

1. Основной поддон
2. Опора механизма
3. Стальная труба, заключенная в резиновую оболочку
4. Монтажная пластина электродвигателя
5. Подшипник в сборе
6. Вал в сборе
7. Электродвигатель
8. Шкив электродвигателя (с конусной стопорной втулкой)
9. Клиновой ремень
10. Шкив вала (с конусной стопорной втулкой)
11. Основание кожуха ременной передачи
12. Кожух ременной передачи
13. Стальной ротор в полиуретановой оболочке

14. Рассеиватель или статор из литого полиуретана
15. Насадка рассеивателя из литого полиуретана
16. Втулка вала из литого полиуретана
17. Хомут втулки вала
18. Воздушное уплотнение из литого полиуретана
19. Торцевая крышка из литого полиуретана
20. Пневматическое управление (в сборе с двухстворчатым клапаном)

Данный тип флотационной машины спроектирован так, чтобы ротор находился в верхней части емкости. Ротор выполняет одновременно три задачи. Первая заключается в подаче пульпы через отсасывающую трубу и циркуляции пульпы внутри камеры. Вторая всасывание окружающего воздуха, диспергация и смешивание его с пульпой. Третья функция – перемешивание содержимого емкости для поддержания содержимого во взвешенном состоянии.

Подкачивающее действие создается центробежной силой, создаваемой вращающимся ротором. Центробежная сила приводит к образованию воронки с разрежением в центре воронки. Такое разрежение приводит к всасыванию воздуха. Способность механизма поддерживать взвешенное состояние является функцией скорости циркуляции содержимого в емкости и распределения размеров частиц породы. Чем грубее помол, тем более интенсивная циркуляция содержимого камеры требуется для достижения однородной смешанной взвеси, которая необходима для эффективной флотации.

Существенным дополнительным преимуществом данной конструкции является отсутствие необходимости в остановке процесса при остановке одной камеры. Обычно процентное содержание твердого составляет порядка 50 %. Это значит, что при остановке механизма уровень осадка будет ниже положения ротора, то есть ротор будет находиться в жидкой фазе, что дает возможность перезапуска без освобождения камеры.

Положение ротора относительно отсасывающей трубы имеет существенное значение на потребляемую мощность и расход воздуха. Изменение на 25 мм может повлиять на потребление энергии на 25 %.



Пена, образующаяся в результате реакции между пульпой, реагентами, и воздухом, выходит на поверхность и переливается через край камеры и желоба. Очень важно, чтобы край перелива был ровным для обеспечения равномерно перелива пены.

#### Вопросы для самопроверки

1. Какие факторы оказывают влияние на флотацию?
2. Какое влияние крупность флотируемых частиц оказывает на результат флотации?
3. В каком случае применяют разбавленные пульпы, а в каком случае более плотные?
4. В каком порядке добавляются реагенты?
5. Какое влияние при флотации минералов оказывают аэрация и перемешивание пульпы?
6. Какое влияние на качество концентратов оказывает интенсивность съёма пены?
7. Какое влияние на расход реагентов оказывает температура пульпы?
8. Какие типы флотационных машин по способу передачи нагрузки из камеры в камеру вам известны?
9. Какие типы флотационных машин по способу аэрации пульпы вы знаете?
10. Опишите конструкцию, принцип действия, достоинства и недостатки, требования к конструкции механической флотационной машины «Механобр».
11. В чем особенность флотационных угольных машин – МФУ?
12. Как вы понимаете явление кавитации?

#### ***5. Практика флотации***

Все минералы по флотуемости можно подразделить на группы.

Классификация минералов по флотуемости по Эйгелесу

1. Неполлярные минералы, обладающие естественной гидрофобностью (самородная сера, графит, каменный уголь, молибденит, тальк, озокерит) флотируются неполярными собирателями, углеводородными жидкостями: керосин, газойль и т. д.

2. Самородные металлы (золото, серебро, медь); сульфиды цветных, черных и редких металлов; теллуриды металлов флотируются сульфгидрильными собирателями.
3. Окисленные минералы цветных металлов (карбонаты свинца, цинка и меди, сульфат свинца и окислы меди и др.) флотируются сульфгидрильными собирателями после сульфидизации.
4. Соли щелочноземельных металлов, не содержащие кремниевой кислоты и карбонаты чёрных металлов: апатиты, фосфориты, кальцит, шеелит, флюорит, барит, сидерит, флотируются оксигидрильными собирателями без активации.
5. Окислы железа, марганца, олова, (магнетит, гематит, касситерит и др.) флотируются без активации оксигидрильными собирателями, но с большим расходом, чем соли щелочноземельных металлов.
6. Силикаты и кварц. При их флотации оксигидрильными собирателями часто требуется активация, если сами минералы не содержат в виде примесей ионы тяжелых металлов. Некоторые минералы этой группы флотируются катионными собирателями.
7. Растворимые в воде минералы (галит, сильвин, бишофит) флотируются из насыщенного раствора обычно катионными коллекторами.

#### *Флотация природногидрофобных минералов*

Минералы первой группы обычно в рудах вместе не встречаются, задача обогащения заключается в отделении этих минералов от пустой породы.

#### *Флотация каменного угля*

Коксующиеся каменные угли обогащаются по гравитационно-флотационным схемам. Энергетические угли не флотируют. Целесообразна порционная загрузка аполярных реагентов, а также подачи их в виде эмульсий. Эмульгирование реагентов улучшает показатели обогащения и на 1/3 уменьшает расход реагентов. Плотность пульпы при флотации каменных углей порядка 10 % твёрдого, 100 г/л. При флотации шламистых углей плотность пульпы понижают, а при малых содержаниях шламов увеличивают. Уголь флотируют по простым схемам. В некоторых случаях есть смысл отдельно флотировать песковую и шлами-

стую фракцию. В качестве собирателя при флотации углей используют аполярные реагенты (керосин, смазочные масла и др.).

#### Флотация молибденовых руд

Наиболее интересны сульфидные руды (молибденит) реже встречаются окисленные (повеллит, ферримолибдит).

Для молибденовых руд характерна агрегатная вкрапленность, поэтому экономически выгодно стадийное обогащение с доизмельчением черновых концентратов. После грубого измельчения руды до крупности 45–50 % класса  $-0,074$  мм, выделяется основная масса пустой породы. Полученный черновой концентрат доизмельчается для высвобождения чешуек молибденита из агрегата и идёт на перемелку. Построение многостадийных схем необходимо потому, что крупные чешуйки молибденита, при измельчении режутся осколками пустой породы, поэтому необходимо как можно быстрее выводить молибденовую руду из цикла измельчения. Многостадийные схемы – многократное измельчение с чередованием операции флотации.

Черновой концентрат подвергают 5-8 перемелкам (иногда их может быть 10-12) и 2-4 операциям измельчения. Недопустимо уменьшение чешуек молибденита. Уменьшение размера ведёт к ухудшению флотации. Молибденит – природно-гидрофобный минерал, флотируется хорошо только по плоскостям спаянности, а по торцам чешуек плохо. Из-за высокой гидрофобности в качестве собирателя при флотации молибденита используют аполярные реагенты (керосин, смазочные масла и др.), несмотря на то, что молибденит является сульфидом и может флотироваться также и ксантогенатами.

#### *Флотация полиметаллических сульфидных руд*

Полиметаллические руды содержат галенит, сульфиды меди, сфалерит, пирит и пустую породу. Промышленными считаются руды, если суммарное количество полезного компонента в полиметаллических сульфидных рудах не менее 2–3 %. В качестве собирателя во всех циклах присутствуют ксантогенаты, аэрофлоты и другие вещества сульфгидрильной группы. Чаще всего используют в качестве собирателя – ксантогенат калия. Задача разделить коллективный концентрат или выделить в концентрат сульфид определенного металла при селективной флотации решается с применением депрессоров – цианидов при по-

мощи ряда Каковского. Цианиды растворяют пленку собирателя только с определенных минералов и при определенном расходе реагента, т. е. избирательно.

#### *Ряд Каковского*

Металлы подразделяются в зависимости от растворимости их ксантогенатов в цианидах на три группы:

I. Свинец, висмут, олово, сурьма, мышьяк, рубидий – не образуют комплексных ионов с цианидами. Их ксантогенаты не растворяются в цианидах и сульфиды этих металлов не депрессируются цианидами.

II. Ртуть, кадмий, медь – образуют с цианидами комплексные ионы средней прочности. Ксантогенаты этих металлов обладают средней растворимостью. Сульфиды этих металлов депрессируются только при больших загрузках цианидов

III. Цинк, палладий, никель, золото, железо – образуют прочные комплексные ионы с цианидами. Их ксантогенаты легко растворимы в цианидах, сульфиды этих металлов легко депрессируются при малых загрузках цианидов.

Таким образом, при применении в качестве депрессоров цианидов флотационные циклы в селективной технологической схеме располагаются в следующей последовательности: свинцовый, медный, цинковый, пиритный.

Сфалерит часто флотируется только после активации медным купоросом.

Задача обогащения полиметаллических руд состоит в получении кондиционных медного, свинцового, цинкового и пиритного концентратов. Флотация протекает в щелочной среде, создаваемой содой или известью. Известь является также депрессором для пирита. Флотацию полиметаллических руд осуществляют по следующим схемам: с прямой селективной флотацией, но чаще всего с частичной коллективной флотацией (коллективно-селективной). Каждый из флотационных циклов обычно состоит из основной флотации, двух-трех перечисток и одной-двух контрольных операций.

Полученные свинцовые концентраты содержат от 40 % до 73 % свинца при извлечении 80–95 %. Цинковые концентраты: содержат 40–60 % цинка, при извлечении 70–93 %. Содержание

меди в медных концентратах – 18–40 %, извлечение меди в концентрат – 60–80 %.

#### *Флотация медно-никелевых руд*

Основные промышленные минералы: пентландит  $(\text{FeNi})_9\text{S}_8$ , халькопирит  $\text{CuFeS}_2$ , никеленосный пирротин  $\text{Fe}_n\text{S}_{n+1}$ . Пирротин имеет изоморфную примесь никеля, и поэтому его извлекают в никелевый концентрат. Медно-никелевые руды характеризуются тонкой вкраплённостью, следовательно, необходимо тонкое измельчение до 90 % класса 200 меш, однако вследствие неравномерной вкраплённости часть концентратов можно получить при более грубом измельчении. Поэтому при флотации медно-никелевых руд применяют стадияльные схемы. Стадияльные схемы к тому же хороши тем, что исключают излишнее шламообразование. Пустая порода представлена чаще всего силикатами, имеющими повышенную флотоактивность, следовательно, необходимо использовать депрессоры породы. Реагенты, используемые при флотации: собиратели – ксантогенаты (бутиловый или амиловый), расход – 70–200 г/т; вспениватели – Т-80, сосновое масло; депрессоры породы – жидкое стекло, карбоксиметилцеллюлоза, расход – 0,3–0,5 кг/т. Депрессоры никельсодержащих минералов – декстрин, смесь извести (до 12 pH) и цианида, извести и сульфата натрия; активаторы – медный купорос; регулятор среды для коллективной флотации – сода.

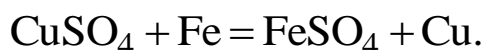
Содержание меди в кондиционных концентратах до 30 % при извлечении – 70–75 %. Суммарное извлечение меди и никеля в медно-никелевый концентрат от 80 до 95 %. Никель извлекается плохо, так как часть его находится в нефлотируемых силикатах и очень тонко распылённых сульфидах, вкраплённых в породу.

#### *Флотация окисленных руд цветных металлов*

Наиболее распространенный способ флотации сульфидрильными коллекторами после сульфидизации минералов сернистым натрием, барием или кальцием. При сульфидизации образуется сульфидная плёнка на поверхности минералов. После лёгкого окисления на поверхности плёнки закрепляются сульфидрильные коллекторы, вытесняя кислородсодержащие анионы. Сульфидная плёнка механически и химически недостаточно прочна, она стирается при перемешивании пульпы, окис-

ляется кислородом. Более глубокая сульфидизация даёт лучший результат, но при этом увеличивается расход сульфидизатора. Для уменьшения расхода применяют дробную подачу сульфидизатора. Основные промышленные минералы в окисленных медных рудах – малахит, азурит. Они легко сульфидизируются с расходом от 0,5 до 1,5 кг/т, при низкой щелочности. Силикаты меди не сульфидизируются и при флотации теряются в хвостах. Руды измельчаются до 65 % класса 200 меш. Применяются простые схемы, которые обычно состоят из основной флотации, двух-трех перечисток и одной-двух контрольных операций. Из руд получают концентраты с содержанием меди 17–25 %. Медь, представленная карбонатами, извлекается до 90 %. Медь в силикатной форме можно частично извлечь оксигидрильными собирателями.

Упорные руды (тонковкраплённые в пустую породу, смешанную с силикатами) извлекаются плохо, не смотря на сульфидизацию. При этом применяют комбинированную схему обогащения по методу Мостовича: растворяют окисленные медные минералы в серной кислоте для выделения цементной меди



В слабокислой среде флотируют цементную медь и медные сульфиды. Концентрат обычно содержит 70 % меди.

*Флотация солей щелочноземельных металлов, не содержащих кремниевой кислоты и карбонатов чёрных металлов*

Из минералов этой группы: шеелит, апатит, флюорит, барит, сидерит. Шеелит, флюорит и апатит содержат в своих анионах ценные элементы: вольфрам, фтор, фосфор, и являются основным сырьём для их получения. Собиратели – жирные кислоты (оксигидрильные). При малом количестве шламов расход собирателя 150–300 г/т. обычно применяют щелочную среду. При селективной флотации этой группы минералов подбор реагентов значительно усложняется. Промышленными рудами считаются руды, которые содержат от 0,1–0,15 WO<sub>3</sub>. Вредными примесями считаются элементы ухудшающие качество стали. Часто шеелитовые руды содержат молибден. Пустая порода представлена силикатами. Хвосты молибденовой флотации направляются в шее-

литовую. Черновой концентрат загрязнён кальциевыми минералами. Он направляется на доводку по методу Петрова. Шеелитовый концентрат содержит до 50–60 % трехокси вольфрама.

Барит извлекается чаще всего из полиметаллических руд после удаления сульфидов. Барит применяется как утяжелитель в нефтяной промышленности. Более качественные баритовые концентраты используются в химической промышленности. Собиратели оксигидрильные. Если порода представлена кварцем или силикатом – обогатимость легкая. Трудная, если порода представлена щелочноземельными минералами (доломит, кальцит). Барит депрессируется жидким стеклом, но только при больших загрузках. При слабых концентрациях, жидкое стекло активирует барит. Содержание высокосортных концентратов до 95%. Схемы стандартные – основная, контрольная, две перечистки.

#### Флотация железных руд

Основные минералы – магнитит, гематит, сидерит. Железные руды обогащаются либо магнитными методами, либо флотацией. Флотация применяется для тонко вкраплённых продуктов, для получения особо чистых концентратов. Собиратели оксигидрильные: жирные кислоты, нафтеновые кислоты. Жирные кислоты чувствительны к ионам кальция и магния, которые к тому же активируют кварц. Поэтому при флотации добавляют эмульгатор типа ОП, или алкилсульфанаты. Большое значение имеет плотность пульпы при перемешивании с собирателем в АКП – аппарате кондиционирования пульпы, лучше всего при содержании 60–70 % твёрдого. Смесь собирателей и углеводородных масел подаётся в виде эмульсий. Схемы простые.

#### Флотация силикатов

Некоторые минералы этой группы, чаще всего представляют собой, пустую породу, но в отдельных случаях являются полезными для народного хозяйства. Это достаточно сложные объекты для обогащения флотацией. Флотация протекает легче при промывке руды, оттирке, очистке поверхности с перемешиванием пульпы, обесшламливании, обработке руд щелочами и кислотами, удалении водорастворимых солей из пульпы. При флотации катионными собирателями состав водной фазы оказывает меньше вредного влияния.

Флотация нефелинового сырья. Нефелиновый концентрат получают из хвостов апатитовых руд. Нефелин  $\text{Na}_6\text{K}_2\text{Al}_8\text{Si}_9\text{O}_{34}$ . Чистый нефелин содержит 33,2 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 15,2 %  $\text{Na}_2\text{O}$ , 7,6 %  $\text{K}_2\text{O}$ . Кондиционный концентрат содержит 29 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и не более 60 % класса 0,088 мм. Флотация протекает в щелочной среде при  $pH = 10$ . Для подщелачивания пульпы используют едкий натр с расходом 0,5 кг/т. Собиратель и одновременно вспениватель – омыленное сырое таловое масло. Пенная фракция, содержащая остатки апатита, направляется в отвал. Камерный продукт является нефелиновым концентратом.

#### *Флотация водорастворимых солей*

Флотацию осуществляют из насыщенных растворов – маточников. Наиболее часто флотацию применяют для разделения сильвина от галита. Насыщенный раствор содержит 10 %  $\text{KCl}$  и 22 %  $\text{NaCl}$ . Флотацию растворимых солей ведут из равновесных растворов. Пересыщенные и ненасыщенные растворы ведут к неудовлетворительным результатам. Правило Кузина: если взять смесь из двух солей, каждая из которых флотируется в собственном растворе, то при флотации смеси одна соль депрессирует другую. *Правило Стремовского*: падает флотируемость той соли, растворимость которой понижается. Собиратели – анионные и катионные. Главное условие – растворимость собирателя в маточнике и адсорбция его на поверхности минерала (жирные кислоты с длинной цепью дают труднорастворимые соединения и мыла и высаливаются из раствора). В качестве собирателя часто используют амины. Амины активны в слабой щелочной ( $pH$  меньше 9) или кислой среде. Исключения алкилсульфанаты, так как они не чувствительны к  $pH$  среде.

При флотации анионным собирателем в пену извлекается галит, а катионным – сильвинит. При флотации сильвинита катионным собирателем, в камерном продукте остается пустая порода и галит. [1, 2, стр. 222-228, 240-247, 258-260, 262-268; 3, 6]

#### Вопросы для самопроверки

1. Опишите классификацию минералов по флотируемости по Эйгелесу.



2. По каким схемам обогащаются коксующиеся каменные угли?
3. Почему молибденит обогащается по многостадийным схемам?
4. Какие минералы содержат обычно полиметаллические руды?
5. Что представляет собой ряд Каковского?
6. Почему при флотации медно-никелевых руд применяют стадийные схемы?
7. В каком случае при флотации окисленных руд цветных металлов применяют комбинированную схему обогащения по методу Мостовича?
8. Каким образом осуществляют доводку черного шепелитового концентрата по методу Петрова?
9. Как извлекают барит?
10. В каких случаях применяются флотационные методы для обогащения железных руд?
11. Назовите качественные кондиционные характеристики нефелинового концентрата.
12. Назовите два правила, которые применяют при флотации растворимых солей.

## ***Вопросы к экзамену***

1. Актуальность применения флотационных методов обогащения для полиметаллических, тонковкрапленных руд, угольных шламов и т. д.
2. Классификация флотационных процессов. Разновидности пенной флотации.
3. Гипотезы элементарного акта флотации.
4. Гипотеза смачивания или краевого угла. Периметр смачивания. Краевой угол (равновесный и гистерезисный).
5. Силы поверхностного натяжения, действующие на единицу длины периметра смачивания. Определение равновесного краевого угла через силы поверхностного натяжения. Зависимость явления смачивания от величины краевого угла.
6. Гистерезис смачивания. Сила гистерезиса. Изменение краевого угла с учетом гистерезиса при наступлении жидкой фазы на газообразную и наоборот. Закономерности гистерезиса. Значение гистерезиса для флотации.
7. Флотационная сила. Зависимость флотационной силы от краевого угла.
8. Флотационная сила. Угол формы. Угол флотации. Зависимость флотационной силы от сил поверхностного натяжения, краевого угла и периметра смачивания частицы.
9. Условие флотационного равновесия. Уравнение Фрумкина.
10. Гидратный слой. Зависимость удельной поверхностной энергии слоя воды между частицей и пузырьком от его толщины для гидрофобной и гидрофильной поверхности частицы.
11. Флотационные реагенты: классификация, назначение.
12. Собиратели: классификация, назначение.
13. Оксигидрильные коллекторы. Структура молекулы олеата натрия. Механизм действия. Практическое применение.
14. Сульфгидрильные собиратели. Структура молекулы. Механизм действия. Практическое применение. Ксантогенаты. Аэрофлоты.
15. Механизм действия ксантогенатов. Гипотеза Шведова.
16. Катионные коллекторы.
17. Аполярные коллекторы. Природа. Механизм действия. Практическое применение.

18. Депрессоры. Механизмы действия депрессоров. Ряд Каковского. Механизм действия цианидов.
19. Реагенты-активаторы. Механизм действия. Практическое применение.
20. Регуляторы среды. Диспергаторы. Флокулянты.
21. Пенообразователи. Механизм действия. Требования к пене. Практическое применение. Типы флотационных пен.
22. Условия, влияющие на результат флотации.
23. Влияние крупности зерен на флотацию.
24. Влияние тонких шламов на результаты флотации.
25. Влияние плотности пульпы на флотацию.
26. Влияние реагентного режима на результаты флотации.
27. Влияние аэрации и перемешивания пульпы на результаты флотации.
28. Кинетика флотации.
29. Влияние интенсивности съема пены на качество флотационного концентрата.
30. Флотационные схемы.
31. Влияние оптимального потока и температуры пульпы на флотацию.
32. Флотационные машины. Требования, предъявляемые к флотомашинам.
33. Типы флотомашин по способу передачи нагрузки из камеры в камеру, по способу аэрации пульпы.
34. Механические флотационные машины. «Механобр», МФР. Конструкция. Принцип действия. Достоинства и недостатки. Требования к конструкции. Явление кавитации.
35. Флотационные машины угольные. МФУ. Конструкция. Принцип действия.
36. Пневмомеханические флотационные машины. ФПР. Конструкция. Принцип действия.
37. Пневматические флотационные машины. Аэролифтные флотационные машины. Принцип действия.
38. Классификация минералов по флотируемости по Эйгелесу М. А.
39. Флотация минералов с высокой естественной гидрофобностью. Флотация каменного угля.

40. Флотация минералов с высокой естественной гидрофобностью. Флотация молибденовых руд.
41. Флотация самородных металлов. Флотация золотых руд.
42. Флотация полиметаллических сульфидных руд.
43. Флотация медно-никелевых руд.
44. Флотация окисленных руд цветных металлов на примере окисленных медных руд. Метод Мостовича.
45. Флотация солей щелочноземельных металлов. Флотация шелитовых руд. Метод Петрова.
46. Флотация солей щелочноземельных металлов. Флотация апатитовых и фосфоритовых руд.
47. Флотация солей щелочноземельных металлов. Флотация баритовых руд.
48. Флотация силикатов. Флотация нефелинового сырья.

## **Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **Основная литература**

1. Абрамов, А. А. Флотационные методы обогащения : учебник : [16+] / А. А. Абрамов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Горная книга, 2019. – 280 с. : ил., табл., схем. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=693203> (дата обращения: 24.05.2025). – Библиогр.: с. 565-572. – ISBN 978-5-98672-413-3. – Текст : электронный.

2. Федотов, К. В. Проектирование обогатительных фабрик : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. (специальности) 130400 «Горн. дело», специализация «Обогащение полез. ископаемых» / К. В. Федотов, Н. И. Никольская. – Москва : Горная книга, 2012. – 536 с. – (Обогащение полезных ископаемых). – Текст : непосредственный.

3. Суслина, Л. А. Флотационные методы обогащения: материалы к лекционному курсу : для студентов очной и заочной формы обучения специальностей 130405 «Обогащение полезных ископаемых» / Л. А. Суслина. – Электрон. дан. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) ; зв.; цв.; 12 см. – Систем. требования: Pentium IV; ОЗУ 8 Мб; Windows 95; (CD-ROM-дисковод); мышь. – Загл. с экрана

4. Трусова, В. В. Флотационные методы обогащения: практикум : учебное пособие / В. В. Трусова. – Иркутск : ИРНИТУ, 2019. – 108 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/217100> (дата обращения: 04.04.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

5. Абрамов, А. А. Флотация. Физико-химическое моделирование процессов : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Обогащение полезных ископаемых» направления подгот. «Горн. дело». Т. 6 / А. А. Абрамов. – Москва : Горная книга, 2010.

### **Дополнительная литература**

6. Справочник по обогащению руд. Обогащительные фабрики / под ред. О. С. Богданова, Ю. Ф. Ненарокова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1984. – 358 с.

7. Разумов, К. А. Флотационный метод обогащения: учеб. пособие. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1975.

8. Методы исследования флотационного процесса / В. И. Мелик-Гайказян, А. А. Абрамов, Ю. Б. Рубинштейн, В. Н. Авдохин, П. М. Соложенкин. – Москва : Недра, 1990.

9. <http://www.74rif.ru/Gremyaha.html> (обогащение титаномагнетитовых руд)

10. [http://www.ntpo.com/patents\\_extraction/extraction\\_1/extraction\\_234.shtml](http://www.ntpo.com/patents_extraction/extraction_1/extraction_234.shtml) (способ обогащения вольфрамсодержащих руд)

### **Программное обеспечение**

КузГТУ обеспечен необходимым комплектом лицензионного программного обеспечения.

### **Интернет-ресурсы**

Информацию обо всех имеющихся электронных ресурсах можно получить в аудитории 1211 (зал электронных ресурсов) и на сайте библиотеки <http://library.kuzstu.ru>, в том числе по разделам:

- тематический указатель периодических изданий
- учебные пособия, изданные в КузГТУ
- информационная система «Технонорматив»
- ресурсы Интернет по профилю КузГТУ

(<http://elib.kuzstu.ru>)

Можно воспользоваться сайтами ведущих фирм – производителей оборудования для переработки полезных ископаемых:

<http://www.lmzip.com>; <http://www.new-technologies.spb.ru>;  
<http://www.sdormash.ru>; <http://www.dromash.ru>; <http://www.hartl.ru>;  
<http://www.drobilki.com>; <http://www.andritz.com/ep>;  
<http://rgt.ru/production/detail/362.html>

и др.

Полезно воспользоваться поисковыми системами Яндекс, Rambler, Yahoo, Google, MSN.