

# **ФЛОТАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ**

*Методические указания к лабораторным работам  
для студентов специальности 21.05.04*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2020**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра обогащения полезных ископаемых

# ФЛОТАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ

*Методические указания к лабораторным работам  
для студентов специальности 21.05.04*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2020

УДК 622.765 (075.83);622.3 (073)

**ФЛОТАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ:** Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *Т.Н. Александрова, А.О. Ромашев*. СПб, 2020. 54 с.

Лабораторные работы знакомят студентов с основными положениями теории и практики флотационных методов, применяемых на фабриках при обогащении металлических и неметаллических полезных ископаемых. Приведены теоретические сведения о флотационном процессе и методики проведения исследования рассматриваемых процессов и обработки полученных результатов.

Предназначены для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело» специализация «Обогащение полезных ископаемых».

Научный редактор проф. *Т.Н. Александрова*

Рецензент проф. *А.В. Александров* (Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД)

© Санкт-Петербургский  
горный университет, 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных тенденций подготовки современного высококвалифицированного специалиста является всемерное развитие творческого начала и инициативы студентов. Решение этой задачи, возможно, прежде всего, путем вовлечения студентов в исследовательскую работу, как в рамках аудиторного учебного процесса, так и во внеучебное время самостоятельных учебных занятий. С целью более глубокого усвоения студентами изучаемого материала и приобретения навыков исследования, в учебной дисциплине «Флотационные методы обогащения» помимо лекций предусмотрены лабораторные работы, которые выполняются каждым студентом индивидуально. На лабораторных занятиях студенты выполняют работы по основным темам курса. Каждая лабораторная работа содержит элементы исследования изучаемого процесса и обработки полученных данных.

Перед началом работы в лаборатории следует детально ознакомиться с правилами техники безопасности и порядком занятий. После этого студент получает задание на проведение работы и выполняет ее. Затем он должен показать преподавателю полученные результаты, убрать свое рабочее место и сдать его лаборанту.

Каждая лабораторная работа выполняется поэтапно:

- собеседование,
- проведение эксперимента,
- обработка результатов эксперимента,
- составление отчета по работе
- защита отчета.

При собеседовании выясняется цель работы и возможность ее осмысленного проведения.

Отчет по работе должен содержать краткие сведения о теории процесса, описание методики исследования, задание, результаты расчетов, предшествующих проведению работы, экспериментальные данные в виде таблиц и графиков, выводы по работе. Работа считается законченной при успешной защите отчета, после чего студент допускается к выполнению следующей работы.

# РАБОТА 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МИНЕРАЛОВ

## Общие сведения

**Смачивание (wettability)** – поверхностное явление, возникающее на границе соприкосновения фаз, одна из которых твердое тело, а другие – несовмещающиеся жидкости или жидкость и газ. Смачивание проявляется в частичном или полном растекании жидкости по твердой поверхности, пропитывании пористых тел и порошков.

**Краевой угол смачивания  $\theta$  (contact angle)** – краевой угол обращенный в воду угол между твердой поверхностью и касательной, проведенной к поверхности воздушного пузырька в точке трехфазного периметра смачивания (рис.2.1). Краевой угол смачивания (далее краевой угол) характеризует степень смачиваемости минеральной поверхности жидкостью и является важным показателем флотационной активности минеральных частиц.

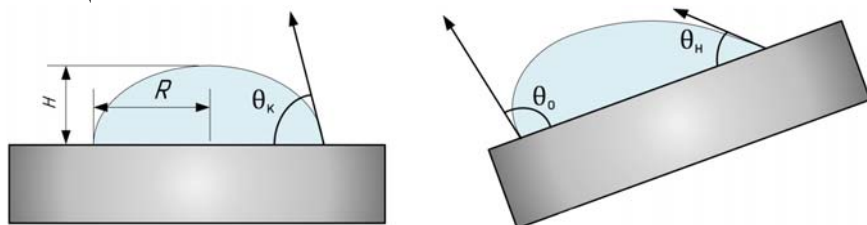


Рис. 1.1 – Схемы измерения краевого угла смачивания:

**Трехфазный периметр смачивания (three-phase wetted perimeter)** – граница соприкосновения трех взаимодействующих фаз – твердой, жидкой и газообразной (например, минерал, вода и воздух). Граница раздела фаз вдоль периметра смачивания характеризуется некомпенсированностью молекулярных сил в поверхностных слоях. Трехфазный периметр смачивания (далее периметр смачивания) отличается повышенной концентрацией реагентов.

В процессе взаимодействия капли или пузырька с твердой фазой происходит увеличение периметра смачивания под действием сил поверхностного натяжения и установление равновесного

значения краевого угла  $\theta_p$ , отвечающего минимуму межфазной поверхностной энергии. При этом в соответствии с законом Юнга (второй закон капиллярности):

$$\cos \theta_p = \frac{(\sigma_{гг} - \sigma_{жг})}{\sigma_{гж}}, \quad (1.1)$$

где  $\sigma_{гг}$ ,  $\sigma_{жг}$ ,  $\sigma_{гж}$  – соответственно поверхностное натяжение на границах раздела «газ–твёрдое», «жидкость–твёрдое», «газ–жидкость»

Взаимодействие жидкой и твёрдой фазы обусловлено притяжением молекул, проявляющимся на поверхности раздела. Энергия, необходимая для разделения фаз, отнесенная к единице площади поверхности контакта, называется *работой адгезии* и является важной характеристикой процесса смачивания. В случае ограниченного смачивания (в присутствии газообразной фазы) работа адгезии определяется следующим образом:

$$W_a = \sigma_{гж} + \sigma_{гг} - \sigma_{гж}. \quad (1.2)$$

С учётом уравнения 1.1 может быть получено выражение для расчёта работы адгезии жидкости к твёрдому телу:

$$W_a = \sigma_{гж} (1 + \cos \theta_p). \quad (1.3)$$

Экспериментальное определение показателей, характеризующих смачиваемость поверхности твёрдой фазы, связано с измерением равновесного краевого угла смачивания с помощью специальных приборов.

Под показателем флотиремости понимают величину  $F$ , характеризующую изменение поверхностной энергии системы при элементарном акте флотации, отнесенную к единице площади контакта газ–твёрдое. При флотации частиц, размер которых значительно меньше размера пузырьков (для обычных условий флотации)

$$F = \sigma_{г-ж} \cdot 91 - \cos \theta_p, \quad (1.4)$$

где:  $\sigma_{г-ж}$  – удельная поверхностная энергия на границе раздела газ – жидкость (для воды равная 72,8),  $\text{мН}\cdot\text{м}^{-1}$ ;  $\theta_p$  – равновесный краевой угол смачивания.

**Гистерезис смачивания** (wetting hysteresis) — замедленное передвижение трехфазного периметра смачивания по твердой поверхности. Явление гистерезиса препятствует достижению равновесного состояния – образованию равновесного угла. Поэтому при непосредственных измерениях  $\theta$  получают значения гистерезисных углов – углов контакта  $\theta_k$ .

Для сравнительной оценки показателей флотуруемости отдельных минералов с достаточной точностью в выражении (1.4) можно пользоваться вместо  $\theta_p$  значением  $\theta_k$ . Для этого достаточно замерить на горизонтально расположенных поверхностях шлифов различных минералов их углы контакта с каплей воды  $\theta_k$  (рис. 1.1), по выражению (1.4) определить значение  $F$  (при  $\theta_p \approx \theta_k$ ) и провести сравнение полученных  $F_i$ :

$$F_{\max}/F_1; F_{\max}/F_2; \dots; F_{\max}/F_i, \quad (1.5)$$

где:  $F_1, F_2, F_i$  – показатели флотуруемости различных минералов, значение которых меньше показателя флотуруемости минерала с наибольшим значением  $F_{\max}$ ,  $\text{мН}\cdot\text{м}^{-1}$ .

Наиболее точно показатель флотуруемости можно определить с помощью измерения гистерезисных углов натекания  $\theta_n$  и оттеkania  $\theta_o$  жидкой фазы на газообразную. Для этого измеряют оба угла контакта водной капли, расположенной на наклонной поверхности шлифа минерала.

Так как  $\theta_n = \theta_p + \Delta\theta_n$ ;  $\theta_o = \theta_p + \Delta\theta_o$  и  $\Delta\theta_n = \Delta\theta_o$ , то

$$\theta_p \cong (\theta_n + \theta_o) / 2$$

Для определения краевого угла смачивания применяют в основном два метода – метод непосредственного измерения и метод расчета угла по форме капли. Краевой угол смачивания по второму методу определяют из следующих соотношений (рис. 1.1, а):

При  $\theta < 90^\circ$ :

$$\cos \theta_k = (r^2 - h^2) / (r^2 - h^2).$$

При  $\theta > 90^\circ$  :

$$\cos \theta_k = 1 - (h/r) \quad (1.6)$$

Хотя второй метод более точный, чем первый, он не пригоден для изменения  $\theta_k$  на наклонных поверхностях шлифов минералов.

**Цель работы.** Экспериментальное определение краевых углов смачивания различных минералов. Расчет показателей флотуемости различных минералов, как в естественном состоянии, так и при обработке их поверхности флотационными реагентами различной концентрации.



Рис. 1.2 - Установка для измерения краевого угла KRUSS DSA25

**Оборудование и материалы.** Установка для измерения краевого угла KRUSS DSA25 (рис. 1.2); шлифы минералов – 8–10 шт.; фильтровальная бумага, дистиллированная вода – 0,5 л; флотационные реагенты – керосин, бутиловый ксантогенат, олеат натрия (0,1; 0,05; 0,01 %), бихромат калия (0,1 %) – по 100 мл; два химических стаканчика (0,25 л).

**Порядок проведения работы.** Работа выполняется в два этапа:

1. Определение краевых углов и показателей, флотуемости естественных (не обработанных реагентами) минералов с помощью измерения  $\theta_k$  как на горизонтальных, так и наклонных шлифованных их поверхностях.

2. Изучение влияния флотационных реагентов на показатель флотуемости. Для этого поверхности различных минералов обрабатывают растворами реагентов собирателей концентрации 0,01; 0,05; 0,1 % с последующим измерением краевых углов.




Например, уголь обрабатывается керосином, сульфидные минералы – ксантогенатами, не сульфидные - олеатом натрия. Обработка поверхности галенита бутиновым ксантогенатом (0,05 %) и обработка той же поверхности бутиловым ксантогенатом (0,05 %), а затем депрессором – хромпиком (0,01 %).

Определение краевых углов в каждом опыте проводят по нижеприведенной методике.

Проведение измерений начинается с установки положения иглы и калибровки.

1. Расположите иглу в верхней части изображения по центру.

2. Отрегулируйте масштаб изображения так, чтобы создаваемая капля была как можно больше и помещалась в размер изображения. Отрегулируйте фокус (рис. 1.3).

3. Нажмите кнопку .

4. Введите внешний диаметр иглы в текстовое поле Object size (размер объекта) (рис. 1.4).

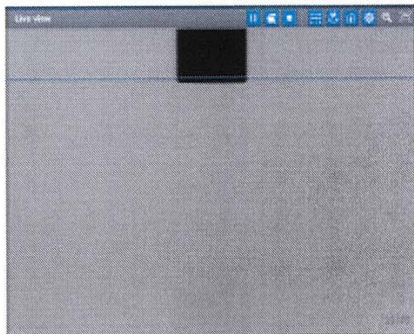


Рис. 1.3. –Регулировка масштаба изображения

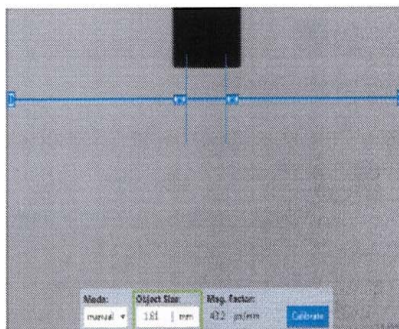


Рис. 1.4. – Ввод данных о внешнем диаметре иглы

7. Подготовить исследуемые жидкости. Набрать необходимый объем для исследования в шприцы 1 и 2. Для проведения исследования данные по шприцам вводятся в окно «Syringe and dosing» (рис. 1.5).

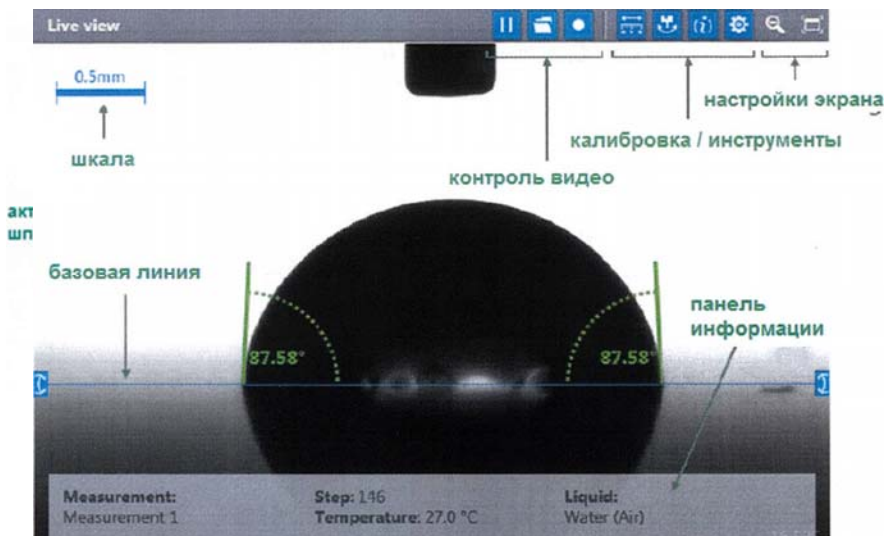


Рис. 1.6. – Замер краевого угла смачивания

8. Выберите шприц из верхнего раскрывающегося меню. С помощью клавиш Ctrl+Home можно выбрать следующий шприц. Жидкость шприцу можно задать в области подготовки. Выбор скорости перемещения позволяет определить, как быстро будут двигаться шприцы: slow (медленная), medium (средняя) или fast (быстрая).

9. Для программирования положения шприца, перемещайте слайдер вверх/вниз или используйте клавиши Ctrl+PageUp / Ctrl+PageDown. Слайдер ведет себя как джойстик, чем дальше его тащить вверх/вниз, тем будет выше скорость перемещения.

10. Для определения Static contact angle (Статический краевой угол): определите положение Dosing (Дозирования) над поверхностью, а положение Deposition (Укладка капли) очень близко к поверхности. Создайте каплю в положение Dosing и поместите её на образец, перейдя в положение Deposition. Позвольте игле вернуться в положение Dosing или Standby и запустите измерение (рис. 1.6).

Результаты измерений заносят в табл. 1.1, 1.2.

Таблица 1.1

Результаты измерений краевых углов смачивания различных минералов

Минерал	№ капли	Краевой угол смачивания $\theta_k$								$F, \text{ мН} \cdot \text{м}^{-1}$	$F_{\text{max}}/F_i$
		Непосредственное измерение				Расчёт по формуле капли					
		$\theta_{1(\text{H})}$	$\theta_{2(\text{O})}$	$\theta_k$	$\theta_{k \text{ ср}}$	$r, \text{ мм}$	$h, \text{ мм}$	$\theta_k$	$\theta_{k \text{ ср}}$		
Уголь	1										
	2										
	3										
Пирит											

Таблица 1.2

Влияние реагентов и их концентрации на краевой угол смачивания и показатель флотуемости

Минерал	Реагенты	Капля 1			Капля 2			Капля 3			$\theta_{k \text{ ср}}$	$F, \text{ мН} \cdot \text{м}^{-1}$	$F_p/F_0$
		$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_k$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_k$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_k$			
Пирит													

**Обработка и оформление полученных данных.** Значение краевых углов смачивания по каждому опыту двух измерений в крайних точках Ж-Т определяют по формулам.

$$\theta_k = (\theta_1 + \theta_2) / 2 \text{ или } \theta_k = (\theta_n + \theta_0) / 2.$$

определение  $\theta_k$  по форме капли ( $r, h$ ) проводят по формулам (1.6).

Среднее значение краевых углов каждой серии опыта определяют как среднее арифметическое

$$\theta_{\text{ксп}} = \sum \theta_k / n,$$

где  $n$  – число измерений в каждой серии опыта.

Показатель флотуемости  $F$  рассчитывают по формуле (2.4), а сравнительную оценку полученных значений  $F$  для различных материалов – по формуле (1.5).

При обработке минералов реагентами полученные показатели флотуемости сравнивают с  $F_0$  – показателем флотуемости минерала без обработки реагентами  $F_p/F_0$ .

Результаты рассчитанных данных заносятся в табл. 2.1, 2.2. Строятся графические зависимости отношений  $F_p/F_0$  от концентрации реагентов  $C$ :  $(F_p/F_0) = f(C)$ .

На основании полученных данных делают выводы о флотировости как отдельных минералов без обработки реагентов, так и при обработке их поверхности реагентами.

## РАБОТА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛОТАЦИИ КАЛЬЦИЙСОДЕРЖАЩИХ МИНЕРАЛОВ

### Общие сведения

Из минералов этой группы наиболее важное промышленное значение имеют: шеелит  $\text{CaWO}_4$ , апатит  $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})_2$ , флюорит  $\text{CaF}_2$ , доломит  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ , кальцит  $\text{CaCO}_3$  и др. Наиболее крупным объектом флотационного обогащения являются апатитовые, шеелитовые и флюоритовые руды.

Для повышения эффективности флотации в пульпу вводят флотационные реагенты.

**Реагенты (reagents)** — вещества, которые способствуют успешной флотации минералов, сорбируясь:

- 1) на поверхности раздела твердое тело - жидкость;
- 2) на границе раздела жидкость - воздух.

К первой группе реагентов относятся собиратели и многие модификаторы флотации (активаторы, депрессоры), ко второй — главным образом пенообразователи.

По назначению реагенты делятся на:

- собиратели (коллекторы),
- вспениватели,
- модификаторы,
- регуляторы.

**Собиратели (коллекторы, устар.) (collectors)** — флотационные реагенты, которые повышают способность флотируемых частиц концентрироваться на поверхности пузырьков газа. Классическими реагентами собирателями являются органические вещества гетерополярного, реже апольярного строения, которые, концентрируясь на поверхности извлекаемых частиц, повышают ее гидрофобность и способствуют прилипанию частиц к пузырькам воздуха. Собиратели подразделяются на ионогенные и неионогенные.

**Амфолитные собиратели. (ampholyte c.)** — собиратели, в зависимости от условий проявляющие свойства как анионоактивных, так и катионоактивных реагентов.

**Ионогенные собиратели. (ionic c.)** — электролиты, образующие в растворе заряженные ионы, в состав которых входят функциональные группы и углеводородный радикал. Эти собиратели могут быть анионными, закрепляющимися на

поверхности минералов в виде отрицательно заряженных ионов (ксантогенаты, дитиофосфаты, карбоновые кислоты и др.), и катионными, закрепляющимися на поверхности минералов в виде положительно заряженных ионов (амины и другие органические производные аммиака).

**Катионоактивные собиратели (*cationic c.*)** — реагенты ионогенного типа с катионом в качестве гидрофобизирующего иона. Катионоактивные собиратели применяют в виде солей, особенно уксусной и соляной кислот (аминоацетаты и аминоклориды). В странах бывшего СССР применяются два катионоактивных собирателя — октадециламин и АНП.

**Неионогенные собиратели (*non-ionic c.*)** — неэлектролиты, это главным образом аполярные водородные жидкости (масла), образующие на поверхности флотируемых минералов гидрофобные пленки.

**Оксигидрильные собиратели (*oxyhydride c.*)** — ионогенные анионные реагенты-собиратели, в функциональную группу которых входят атомные группы:  $\text{COOH}$ ,  $\text{OH}$ ,  $-\text{OSO}_3$ ,  $-\text{SO}_4$  и др. Величина связи собирателя с поверхностью минерала характеризуется прочностью закрепления.

**Сульфгидрильные собиратели (*sulphydryl c.*)** — ионогенные анионные собиратели, в состав солидофильной группы которых входит двухвалентная сера. Широко применяются при флотации сульфидных и некоторых окисленных минералов цветных металлов. Наиболее применяемые в промышленности группы — ксантогенаты и дитиофосфаты.

Собиратели формируют или усиливают природную гидрофобность поверхности и сокращают время, необходимое для прилипания частиц к пузырькам, т.е. увеличивают скорость прилипания. Основной физической механизм действия собирателей сводится к снижению энергии десорбции  $S(h)$  внешних слоев гидратной пленки, смачивающей твердую поверхность, и повышению скорости ее разрушения. Это приводит к уменьшению времени индукции и увеличению результирующей всех сил  $F(h)$ . Действие собирателей обычно имеет недостаточную селективность и приводит к флотации нескольких минералов. Для выделения в пенный продукт одного или группы минералов используют реагенты-модификаторы.

Модификаторы (активаторы или депрессоры) регулируют действие собирателей, усиливая или ослабляя его.

**Активаторы (activators)** — флотационные реагенты-модификаторы, усиливающие взаимодействие реагентов-собирателей с поверхностью флотируемых частиц. Активаторы непосредственно взаимодействуют с поверхностью извлекаемых частиц. Типичными активаторами являются медный купорос, сернистый натрий и т. д.

**Депрессоры (подавители) (depressors, depressants)** — флотационные реагенты-регуляторы, применяемые для улучшения селективности флотации. Депрессоры закрепляются на поверхности определенных минералов и препятствуют адсорбции собирателя на них, а также гидрофилизуют поверхность этих минералов и тем самым предотвращают их флотацию одновременно с другими минералами. Типичными депрессорами являются соли неорганических кислот, содержащие анионы  $S^{2-}$ ,  $SO_3^{2-}$ ,  $SiO_3^{2-}$ ,  $CN^-$ ,  $H_2SO_3$ , а также известь, углеводы, лигнин, различные органические красители, танин и др.

**Неорганические депрессоры (non-organic d.)** — соли неорганических кислот, содержащие анионы, сернистый натрий, цианиды, соли цинка, соли хрома, некоторые комплексные соединения, жидкое стекло и др.

**Органические депрессоры (organic d.)** — высокомолекулярные органические вещества. Органические депрессоры в зависимости от содержащихся в них полярных групп, по Горловскому, делятся на четыре класса:

- неионогенные (крахмал, оксиэтилцеллюлоза и др.),
- анионные (карбоксиметилцеллюлоза, лигносульфонаты и др.),
- катионные (поливиниламин, хитозан, сополимеры винилпиридина и др.),
- амфотерные (гидролизованный полиакриламид, казеин и другие белки).

Регуляторы среды изменяют значение pH пульпы.

**Регуляторы pH среды (pH modifiers)** — реагенты, которые изменяют форму нахождения собирателей в воде (ионную, молекулярную), выводя из нее нежелательные ионы, пептизируя

(или коагулируя) тонкие шламы, а также путем непосредственной адсорбции ионов  $H^+$  и  $OH^-$  на минералах.

Кроме того существуют модификаторы пены, меняющие структуру пены или гасящие ее. Оба типа этих реагентов часто являются и модификаторами флотации.

**Пенообразователи (*frothers*)** — реагенты, применяемые для тонкого диспергирования вводимого во флотомашину воздуха и образования пены. Обеспечивают механическую прочность воздушных пузырьков и препятствуют их коалесценции в объеме пульпы и на ее поверхности в результате адсорбции их на границе раздела фаз жидкость–газ. Пенообразователи повышают устойчивость пены, насыщенной частицами флотируемого минерала, замедляют всасывание пузырьков, иногда влияют на собирательное действие реагентов и прочность прилипания частиц к пузырькам. Основные пенообразователи — ИМ-68, циклогексанол, диметилфталат, сосновое масло, ОПСБ, метил изобутил карбинол, реагенты Э-1 и Э-1А.

**Пеногасители (*foam breakers*)** — реагенты, способствующие уменьшению устойчивости, т.е. разрушению (гашению), пены. Механизм действия пеногасителя — повышение гидратированности поверхности минеральных частиц, чем достигается их удаление с поверхности пузырьков внутрь жидкой прослойки и уменьшение силы сцепления частиц в поверхностном слое.

Вспениватели адсорбируются на поверхности раздела жидкость–газ и способствуют образованию пены. Применяются для тонкого диспергирования пузырьков воздуха, вводимого в камеру флотомашин, для повышения прочности их оболочек и снижения скорости всплывания. Это ведет к уменьшению коалесцирующих (сливающихся между собой) пузырьков.

Классификация реагентов во многом условна, т.к. имеются собиратели, обладающие свойствами вспенивателей и наоборот.

Все кальцийсодержащие минералы легко флотируются жирными карбоновыми кислотами, их мылами, а также алкилсульфатами. В качестве собирателя иногда используют олеиновую кислоту, но чаще - ее заменители. Олеиновая кислота, является ненасыщенной и имеет одну двойную связь в середине



углеводородной цепи:  $C_{17}H_{33}COOH$ . Ей соответствует насыщенная кислота  $C_{17}H_{35}COOH$  – стеариновая.

Промышленной значение имеют также аналоги олеиновой кислоты с большим числом двойных связей: линолевая – две двойных связи  $C_{17}H_{31}COOH$ , линоленовая – три двойных связи  $C_{17}H_{29}COOH$ .

Заменителями олеиновой кислоты в промышленности являются продукты различных производств, содержащие жирные кислоты: олеин, сульфатное мыло, талловое масло, нафтеновые кислоты, синтетические жирные кислоты СЖК, кубовые остатки синтетических жирных спиртов КОС, окисленные углеводороды, отходы масложировых и других химических производств.

**Жирные кислоты** – хорошие собиратели для не содержащих кремнезем солей щелочноземельных металлов и карбонатов черных металлов: кальцита  $CaCO_3$ , флюорита  $CaF_2$ , шеелита  $CaWO_4$ , апатита  $Ca_5(PO_4)_3(Fe, Cl, OH)$ , барита  $BaSO_4$ , (витерита  $BaCO_3$ , сидерита  $FeCO_3$ , родохрозита  $MnCO_3$ ).

Механизм закрепления – хемосорбционный. Образуют на поверхности минерала трудно растворимые мыла с ионами щелочноземельных и тяжелых металлов. Собиратели этого типа чувствительны к рН среды, лучше работают в щелочной среде. Если флотацию нужно вести в кислой среде, то мыла используют в виде растворов в углеводородах или в смеси с другими ПАВ. Все жирнокислотные собиратели обладают свойствами сильных вспенивателей.

Алкилсульфаты и алкилсульфонаты являются анионными собирателями-вспенивателями, способными флотировать несulfидные минералы. Обладают также моющими свойствами и входят в состав многих стиральных порошков.

Соли щелочных металлов алкилсерной кислоты называются **алкилсульфатами** и имеют общую формулу  $R-O-SO_3-Me$ . При взаимодействии серной кислоты  $H_2SO_4$  с углеводородами получают сульфоновые кислоты.

Соли щелочных металлов сульфоновых кислот называются **алкилсульфонатами** и имеют общую формулу  $R-O-SO_2-Me$ .

Эти собиратели лучше сохраняют свою активность в жесткой воде, чем карбоновые кислоты. Основные реагенты: алкилсульфаты «Новость» - смесь с углеводородными радикалами

C<sub>10</sub>-C<sub>20</sub>, алкилсульфаты вторичных высших спиртов (C<sub>11</sub>-C<sub>20</sub>), сульфонол НП (C<sub>11</sub>-C<sub>12</sub>), сульфированные нефтепродукты: сульфированный керосин, реагент ОРС – смеси с углеводородами.

Механизм действия - хемосорбция. На поверхности минерала образуют труднорастворимые соединения с катионом решетки. Селективность флотации достигается подбором рН. Особенностью реагентов этой группы является нечувствительность к жесткости воды, лучшая растворимость по сравнению с жирными кислотами, особенно в кислых средах.

При флотации кристаллических минералов из пульп с небольшим количеством шламов расход собирателя составляет 0,15-0,3 кг/т. При флотации же пористых минералов, например фосфоритов, из пульп с высоким содержанием шламов расход собирателя может возрасти в пять и более раз. Обычно применяют щелочную среду. В качестве депрессоров пустой породы используют жидкое стекло в сочетании с содой и кремнефтористым натрием.

**Цель работы:** исследовать влияние расхода реагентов на результаты флотации апатита.

**Необходимое оборудование:** аналитические весы, пневмо - механическая флотационная машина с автоматическим снятием пенного продукта (фирмы «Laarmann») (рис. 2.1), вакуум-фильтр, сушильный шкаф.

**Порядок выполнения работы:**

Исследование процесса флотации проводят на искусственной биминеральной смеси или руде, состоящей из апатита и кварца крупностью или руде.

Исследуется три расхода собирателя и три расхода депрессора:

В камеру флотомашины заливается небольшое количество воды (приблизительно половину объема камеры), затем включается импеллер при закрытом воздухе и засыпается навеска руды. После перемешивания пульпы в камеру добавляется вода так, чтобы уровень пульпы достигал порога камеры. Затем в пульпу



Рис. 2.1. Флотационная машина Лаарманн

добавляется соответствующей пипеткой рассчитанный объем реагентов. Последовательность подачи реагентов и время агитации пульпы с каждым реагентом указаны на рис. 2.1. Требуемый объем реагента в миллилитрах рассчитывается по формуле:

$$V = q \cdot P / 10000 \cdot C$$

где  $q$  - заданный расход реагента, г/т;  $P$  - масса исходной навески, г;  $C$  - концентрация реагента, %.

После этого открывается воздух и проводится флотация. Время основной и контрольной флотаций указаны на рис. 2.1. По мере снятия пены необходимо следить за уровнем пульпы в камере (при необходимости добавлять воду). После окончания флотации пенный и камерный продукты обезводить на вакуум-филт্রে, высушить в сушильном шкафу и взвесить. Полученные результаты заносятся в таблицу (см. таб. 2.1) и рассчитываются основные технологические показатели.

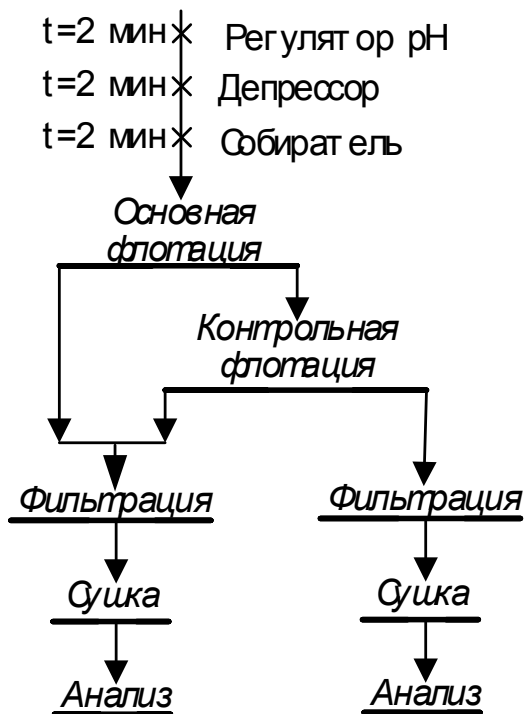


Рис. 2.2. Схема опыта

Выход продукта определяется по формуле:

$$\gamma_i = \frac{Q_i}{Q_{\text{исх}}} \cdot 100, \%$$

где:  $Q_i$  - масса продукта,  $Q_{\text{исх}}$  - масса исходной навески, г.

Содержание  $P_2O_5$  в продукте определяется по формуле:

$$\beta_{P_2O_5} = \frac{Q_{P_2O_5}}{Q_{\text{исх}}} \cdot \beta_M, \%$$

где:  $P_{P_2O_5}$  - масса апатита в  $i$ -том продукте, г.,  $Q_i$  - масса  $i$  продукта, г.,  $\beta_M$  - содержание  $P_2O_5$  в апатите, % (задается преподавателем) или по результатам анализа на РФА.

Извлечение  $P_2O_5$  в продукт определяется по формуле:

$$\varepsilon_{P_2O_5} = \frac{\gamma_i \beta_i}{\beta_{исх}}, \%$$

где:  $\gamma_i$  - выход итого продукта, %;  $\beta_i$  - содержание  $P_2O_5$  в  $i$  продукте, %;  $\beta_{исх}$  - содержание  $P_2O_5$  в исходной руде, %.

Таблица 2.1

Результаты опытов флотации апатита

№	Реагентный режим	Продукт	$Q_i$ , г	$\gamma_i$ , %	$P_{P_2O_5}$ , г	$\beta_{P_2O_5}$ , %	$\varepsilon_{P_2O_5}$ , %
1		К-т Хв. Исх.					
2		К-т Хв. Исх.					
..		К-т Хв. Исх.					
$n$		К-т Хв. Исх.					

По экспериментальным данным построить график зависимости результатов флотации от расхода собирателя и рекомендовать оптимальный расход.

### РАБОТА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛОТАЦИИ ЕСТЕСТВЕННО-ГИДРОФОБНЫХ МИНЕРАЛОВ

#### Общие сведения.

К этой группе относятся неполярные минералы, обладающие высокой естественной гидрофобностью. Таких минералов в природе немного, к ним относятся: самородная сера, графит, каменный уголь, молибденит и тальк. Минералы этой группы плохо смачиваются водой. Краевой угол смачивания для них на границе вода - воздух по данным П.А. Ребиндера, больше  $60^\circ$ , а на границе вода - углеводородная жидкость больше  $127^\circ$ . Поэтому при столкновении капелек углеводородной жидкости с минералами этой группы она частично растекается по поверхности минералов. Закрепившиеся на минералах капельки увеличивают их гидрофобность и флотируемость. На погруженных в воду полярных минералах углеводороды не растекаются и не закрепляются. Считают, что закрепление аполярных реагентов происходит в две стадии, варианты которых 1 и 2 показаны на рис. 3.1.

На I стадии закрепляется одна или несколько капель неполярной жидкости на твердой поверхности, что аналогично закреплению пузырька воздуха. На второй стадии капля растекается.

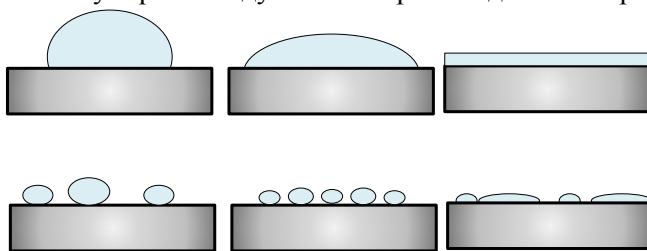


Рис. 3.1. Закрепление аполярных реагентов

Условие равновесия капли аполярного реагента на твердой поверхности без учета гистерезиса смачивания выражается из уравнения Давидова-Неймана:

$$\sigma_{т-ж} - \sigma_{т-реагент} = \sigma_{реагент-ж} \cos\theta_{реагент-т}$$

Работа адгезии между маслом и твердой поверхностью равна величине изменения свободной энергии системы при отрыве капли от поверхности:

$$A_{p-t} = \sigma_{p-j} + \sigma_{t-j} - \sigma_{t-p} = \sigma_{p-j} - \sigma_{p-j} \cdot \cos\theta_{p-t} = \sigma_{p-j} \cdot (1 - \cos\theta_{p-t}).$$

Адгезионное натяжение аполярного реагента равно:

$$m = A_{p-t} - \sigma_{p-j} = \sigma_{t-j} - \sigma_{t-p} = \sigma_{p-j} \cos\theta_{p-t}.$$

Из соотношения следует, что для растекания капли масла (увеличения  $m$ ) необходимо, чтобы краевой угол смачивания реагентом твердой поверхности был как можно меньше (реагент лучше смачивал минерал), а поверхностное натяжение на границе реагент-жидкость было как можно больше. Адсорбция аполярных реагентов на поверхности минерала является физической.

Гидрофобизирующий эффект для аполярных реагентов зависит прежде всего от их вязкости.

**Вязкость (viscosity)** — свойство жидкостей, суспензий, характеризующее сопротивление действию внешних сил, вызывающих их течение.

Вязкость растет в гомологическом ряду с увеличением числа атомов углерода и появлением разветвления углеводородной цепи. Чем сильнее притяжение молекул углеводорода друг к другу, тем больше вязкость. При этом возникают силы такой же природы, как и при взаимодействии с поверхностью минерала. Молекулы аполярного реагента, расположенные в непосредственной близости к решетке минерала, одновременно взаимодействуют с ней и со следующим соседним слоем своих молекул. Энергия этого взаимодействия примерно одинакова. Отсюда следует, что чем выше энергия взаимодействия молекул углеводорода между собой и выше их вязкость, тем больше энергия их взаимодействия с решеткой минерала.

С увеличением вязкости реагентов увеличивается и работа адгезии к поверхности твердой фазы. При одной и той же вязкости работа адгезии зависит от величины дипольного момента молекулы аполярного реагента, от структуры реагента и его поляризуемости. Поляризуемость углеводорода связана с его структурой и поляризующим действием на молекулы реагента решетки минерала.

Это действие особенно заметно у минералов с преобладанием ионных связей. Отсюда вытекает, что углеводородные масла имеют способность к адгезии на поверхности окисленных минералов. Хотя для флотации окисленных минералов эти реагенты длительное время не применялись.

Чем больше дипольный момент молекулы, тем ниже эффект гидрофобизации. Это связано с повышенной активностью молекул углеводорода к воде. Лучшей гидрофобизирующей способностью обладают ароматические углеводороды. Исследованиями установлено, что аполярные реагенты при закреплении частицы на пузырьках формируют каемку реагента вдоль трехфазного периметра контакта, увеличивая тем самым прочность закрепления.

Аполярные жидкости также образуют граничные слои у поверхности минерала. В пограничном слое структура углеводорода более упорядочена по сравнению с удаленными от минерала слоями. Особенно это характерно для минералов с ионной решеткой и при значительной доле ионной связи в ней.

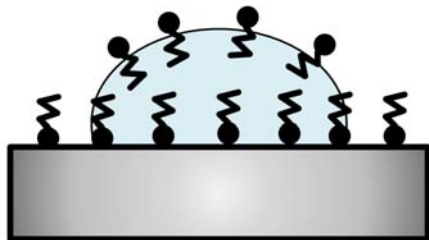


Рис. 3.2. Аполярный реагент-вода

Конечный результат образования пленки аполярного реагента зависит от гидратированности поверхности минерала. Поэтому особое значение имеет предварительная обработка ее ПАВ, которые

снижают гидратированность поверхности.

Если в составе аполярного собирателя есть поверхностно-активные вещества, то их молекулы адсорбируются на поверхности раздела «аполярный реагент-вода» (рис. 3.2). При этом углеводородные группы направлены в среду аполярного реагента, а полярные – в сторону воды.

Молекулы ПАВ снижают разность полярностей между поверхностью минерала и аполярного собирателя и облегчают его закрепление на минерале.

*Влияние различных факторов на действие собирателей.*



Концентрация собирателя влияет на скорость взаимодействия с минералом и скорость формирования адсорбционного слоя реагента до определенного предела. Скорость взаимодействия реагента увеличивается при повышении его концентрации в растворе. Конечное значение краевого угла смачивания достигается тем быстрее, чем короче углеводородный радикал и чем выше концентрация реагента.

Для обеспечения эффективности действия собирателя важно подобрать время его контакта с пульпой и место загрузки реагента в процесс. Это зависит от свойств руды и реагента. Действие собирателя на свежие грани минерала достигается загрузкой реагента в мельницу. Для длительного контакта реагентов используют контактные чаны, объем и число которых выбирается по времени контакта реагента с пульпой. Для быстродействующих собирателей подачу осуществляют в камеру машины. Используют дробную подачу – в несколько приемов, и единовременную. Каждый из способов имеет свои достоинства и недостатки в зависимости от условий ведения процесса, свойств руды и реагентов.

Избыток собирателя нежелателен, т.к. нарушается селективность процесса. При этом воздушные пузырьки перегружаются минеральными частицами, ход процесса флотации нарушается. Кроме того, в пену могут увлекаться породные частицы. У сульфидных минералов мелкие частицы окисляются более интенсивно, чем крупные. Образующиеся продукты окисления переходят в раствор в большем количестве и забирают на себя часть реагента, что требует повышения расхода собирателя. Кроме того, поглощение минералами продуктов окисления ведет к сглаживанию их природных физико-химических различий, что снижает селективность их разделения.

Температура пульпы не оказывает значительного влияния на процесс. Однако, при ее повышении улучшаются показатели и снижается расход реагента в случае применения малорастворимых в воде или медленно взаимодействующих собирателей.

При использовании в качестве собирателя керосина, смазочных масел и других углеводородов можно отделить минералы этой группы от всех других. Расход керосина составляет 0,5-1,5 кг

на 1 т руды и может быть снижен эмульгированием керосина перед подачей в машину.

Естественно-гидрофобные минералы обычно совместно в рудах не встречаются, поэтому задача обогащения сводится к отделению их от пустой породы и сульфидов (при флотации молибденовых руд). Сера, графит, уголь и тальк имеют относительно малую плотность, поэтому максимальная крупность флотирующихся зерен для них несколько выше, чем для других минералов: около 0,5 мм. Молибденит имеет повышенную плотность, но чешуйчатая форма зерен и высокая их гидрофобность обеспечивают возможность флотации этого минерала такой же крупности, как и предыдущих.

**Цель работы:** исследовать влияние расхода реагентов на результаты флотации графита (серы).

**Необходимое оборудование:** аналитические весы, пневмо - механическая флотационная машина с автоматическим снятием пенного продукта (фирмы «Laagmann») (рис. 3.1), вакуум-фильтр, сушильный шкаф.

#### **Порядок выполнения работы**

Исследование процесса флотации проводят на искусственной биминеральной смеси, состоящей из графита (серы) крупностью и кварца или на другом естественном объекте. В качестве собирателя используется водная эмульсия керосина, депрессора кварца - жидкое стекло (реагенты могут быть заменены по указанию преподавателя).

Исследуется три расхода собирателя и три расхода депрессора (по указанию преподавателя). Схема проведения опыта показана на рисунке 3.3, формулы для определения объема добавляемых реагентов и расчета основных показателей обогащения приведены в работе 1.

Результаты экспериментальных исследований заносятся в таблицу (см. таб. 2) и по ним строится график зависимости извлечения и содержания графита (серы) в концентрате от расхода реагентов. По полученным данным делается вывод об оптимальном реагентом режиме флотации.

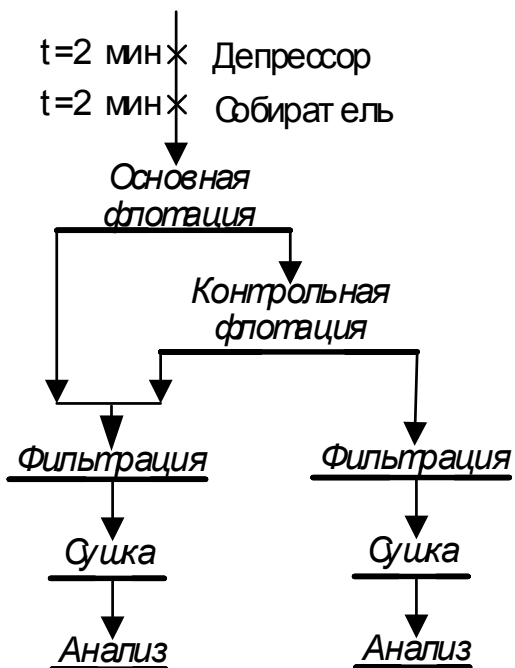


Рис. 3.3. Схема флотации естественно гидрофобных минералов

Таблица 3.1

Результаты опытов флотации графита (серы)

№	Реагентный режим	Продукт	$Q_i$ , г	$\gamma_i$ , %	$P_i$ , г	$\beta_i$ , %	$\epsilon_i$ , %
1		К-т Хв. Исх.					
2		К-т Хв. Исх.					
...		К-т Хв. Исх.					
$n$		К-т Хв. Исх.					

## РАБОТА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛОТАЦИИ СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛОВ

### Общие сведения

Основным источником получения тяжелых цветных металлов являются сульфидные руды, в которых кроме сульфидов основного металла почти всегда присутствуют сульфиды железа (пирит или пирротин), что значительно усложняет выбор оптимальной схемы их обогащения.

Основными собирателями при флотации сульфидов из руд цветных металлов являются **сульфгидрильные собиратели** - ксантогенаты и дитиофосфаты (аэрофлоты): этиловые, изопропиловые, изобутиловые.

Сульфгидрильные собиратели являются наиболее эффективными и широко применяются при флотации сульфидных и некоторых окисленных руд цветных металлов. Сульфгидрильные собиратели относятся к ионогенным анионоактивным реагентам. В состав их солидофильной группы входит сульфгидрил – SH. Соединения, содержащие эту группу, образуют производные, в которых водород сульфгидрила замещен на атом металла.

К сульфгидрильным собирателям относятся ксантогенаты (ксантаты), аэрофлоты, меркаптаны и тиофенолы.

**Ксантогенаты** – это соли ксантогеновых кислот, являющихся производными угольной кислоты, в которой атом кислорода замещен атомом серы (рис. 4.1).



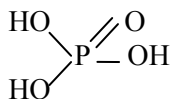
Угольная      Монотиоугольная      Дитиоугольная      Тритиоугольная

Рис. 4.1. Ксантогенаты

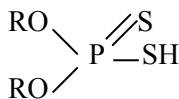
При замене атома водорода в радикале на группы SH с разным количеством атомов S и H получается гомологический ряд ксантогеновых кислот.

**Ксантогенаты** – это твердые кристаллические вещества, имеют характерный запах, не обладают пенообразующими

свойствами, что позволяет регулировать их расходы в широких пределах без нарушения процесса пенообразования. Более всего применяют ксантогенаты калия, хорошо растворимые в воде, что обеспечивает точную дозировку их в процессе, равномерное распределение в пульпе. Ксантогенаты неустойчивы в кислой среде, особенно при pH менее 5, при повышении температуры. Хранить их следует в прохладном месте, в сухом виде в закрытой таре. Устойчивость ксантогенатов тем выше, чем длиннее углеводородный радикал. Для флотации сульфидных руд характерна слабощелочная среда. Основные сульфидные минералы: сфалерит (цинковая обманка) ZnS, галенит PbS, англезит PbSO<sub>4</sub>, ковелин CuS, борнит Cu<sub>2</sub>S CuS FeS, халькопирит CuFeS<sub>2</sub>, халькантит CuSO<sub>4</sub>, пирит FeS<sub>2</sub>, аргентит Ag<sub>2</sub>S, прустит Ag<sub>3</sub>AsS<sub>3</sub>.



Фосфорная кислота



Дитиофосфорные кислоты

Рис. 4.2. Аэрофлоты

### *Аэрофлоты*

— органические производные дитиофосфорной кислоты. Их можно рассматривать как фосфорную кислоту, в которой два атома кислорода

замещены двумя атомами серы, а два атома водорода — двумя углеводородными радикалами (рис. 4.2).

В зависимости от строения углеводородного радикала дитиофосфорные кислоты образуют гомологический ряд и являются жидкими аэрофлотами.

Соли щелочных металлов дитиофосфорных кислот дают сухие аэрофлоты. Аэрофлоты применяют, когда необходимо получить сульфидные концентраты цветных металлов (ZnS, CuS, CuSO<sub>4</sub>), по возможности свободные от черного металла — железа. По действию аэрофлоты слабее ксантогенатов, но более устойчивы в

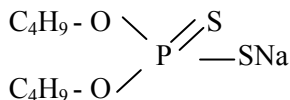


Рис. 4.3. Содовый бутиловый аэрофлот

кислых средах, не окисляются в пульпе кислородом воздуха.

Чаще используется содовый бутиловый аэрофлот (рис. 4.3): два радикала R=C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>, один атом водорода в сульфгидриле —SH заменен натрием —SNa. Порошок, растворимый в воде, флотирует

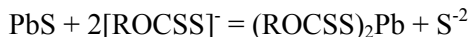
сульфиды, пенообразующими свойствами не обладает.

Все сульфгидрильные реагенты имеют общий механизм действия, который заключается в сульфидирующем действии на поверхность минерала сульфгидрилом. Основным механизмом взаимодействия является хемосорбция, т.е. закрепление происходит во внутренне обкладке ДЭС. Закрепление собирателя заменяет связи диполей воды с твердой фазой более устойчивыми, энергетически выгодными и прочными связями с молекулами реагента. Происходит образование ксантогената металла.

Д.А. Шведовым была разработана гипотеза взаимодействия, т.н. гипотеза Шведова.

**Гипотеза Шведова (Shvedov's hypothesis)** — гипотеза, обосновывающая механизм действия флотационных реагентов, представляющих закрепленные на минералах поверхностные соединения, свойства которых не могут быть отождествлены со свойствами соединений, находящихся непосредственно в растворе. Гипотеза Шведова показала значение поверхностных соединений для флотации и явилась стимулом для дальнейшего изучения свойств и закономерностей образования поверхностных соединений.

Поверхность свежеизмельченного неокисленного сульфидного минерала имеет свободные электроны. Поэтому на ней не может адсорбироваться отрицательно заряженный анион ксантогената. Но в пульпе сульфидные минералы быстро окисляются кислородом и на их поверхности образуются соединения, состав которых зависит от условий окисления. Например, на поверхности галенита PbS образуется пленка окислов различного состава: PbSO<sub>4</sub>, PbS<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbCO<sub>3</sub> или HPbO<sub>2</sub>. При этом кислород связывает свободные электроны. Тогда анион ксантогената вытесняет с поверхности минерала ионы SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>-2</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> и адсорбируется с образованием более прочной связи с катионом минерала:



Диксантогенид  
свинца

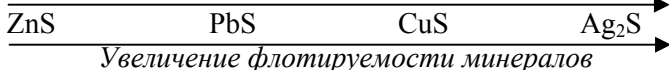
Присутствие на поверхности физически сорбированного диксантогенида - продукта окисления ксантогената – является

необходимым условием для химической адсорбции ксантогената. Таким образом, одновременно протекает физическая и химическая адсорбция.

При длительном действии кислорода на поверхности сульфидного минерала образуется толстая окисная пленка, которая ухудшает адсорбцию ксантогената и увеличивает его расход. Обычно расходы ксантогената составляют 30-100 г/т руды.

Диксаногенид имеет низкую растворимость. Наибольшей растворимостью обладают ксантогенаты щелочных металлов (K, Na), затем идут ксантаты щелочно-земельных металлов (Zn, Ca). Ксантогенаты тяжелых металлов малорастворимы ( $Pb^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$ ,  $Fe^{+4}$ ). Лучше флотируются ксантогенатами сульфиды тех минералов, на поверхности которых ксантогенаты образуют менее растворимые соединения. Таким образом, наблюдаются следующая закономерность:

Снижение растворимости поверхностных соединений ксантогенатов



Прочность закрепления собирателя зависит и от природы аниона решетки минерала.

Для собирательного действия реагента также важно, принадлежит его углеводородный радикал к жирному или ароматическому ряду. У жирного ряда углеводородный радикал открытый, у ароматического – циклический. Действие собирателей с циклическим радикалом, содержащим шесть атомов углерода, близко к действию собирателя с открытым радикалом и двумя атомами углерода.

Химическая связь и величина ее энергии зависят от состава и структуры солидофильной группы. Изменения в составе солидофильной группы дают различия в собирательном действии реагентов. Это связано с изменением энергии химической связи аниона собирателя с катионом решетки минерала. Например, введение второго атома серы в солидофильную группу ксантогената значительно усиливает его действие. Введение третьего атома серы также увеличивает собирательную способность, но гораздо меньше.

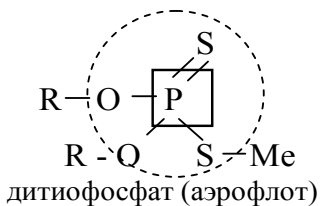
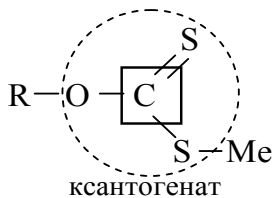


Рис. 4.4. Строение центрального ядра солидофильной группы

Существенное влияние на свойства собирателей имеет строение центрального ядра солидофильной группы (рис. 8). Например, фосфор в составе солидофильной группы дитиофосфатов имеет валентность, равную пяти. Поэтому он сильнее смещает электронное облако серы по направлению к центру молекулы. Кроме того, энергия связи серы с фосфором более сильная, чем с катионом решетки минерала. Растворимость поверхностных

соединений в этом случае выше, чем у ксантогенатов. Углерод в солидофильной группе ксантогената имеет валентность равную четырем. Поэтому он меньше смещает электронное облако серы и связь серы с катионом решетки в этом случае сильнее, чем в молекуле дитиофосфата.

Это обуславливает более сильные собирательные свойства ксантогенатов по сравнению с дитиофосфатами.

В качестве пенообразователей на обогатительных фабриках России применяют в основном реагенты: сосновое масло, Т-80 (смесь спиртов пиранового и диоксанового ряда с некоторыми гликолями), ОПСБ (смесь монобутиловых эфиров полипропиленгликолей), МИБК (метилизобутилкарбинол). Как правило, флотацию сульфидов осуществляют в слабощелочной среде, создаваемой содой. Для подавления флотации минералов пустой породы используют жидкое стекло, КМЦ и др.

**Цель работы:** исследовать влияние расхода реагентов на результаты флотации сульфидных минералов - галенита и халькопирита.

**Необходимое оборудование:** аналитические весы, пневмо - механическая флотационная машина с автоматическим снятием



пенного продукта (фирмы «Laarmann»), вакуум-фильтр, сушильный шкаф.

### Порядок выполнения работы

Исследование процесса флотации проводят на сульфидсодержащей руде. В качестве собирателя используется бутиловый ксантогенат калия, депрессора кварца - жидкое стекло, регулятора среды – сода; вспенивателя - сосновое масло (реагенты могут быть заменены по указанию преподавателя).

Исследуется три расхода собирателя. После агитации пульпы с регулятором среды необходимо измерить рН. Схема проведения опыта показана на рисунке 4.5, формулы для определения объема добавляемых реагентов и расчета основных показателей обогащения приведены в работе 1.

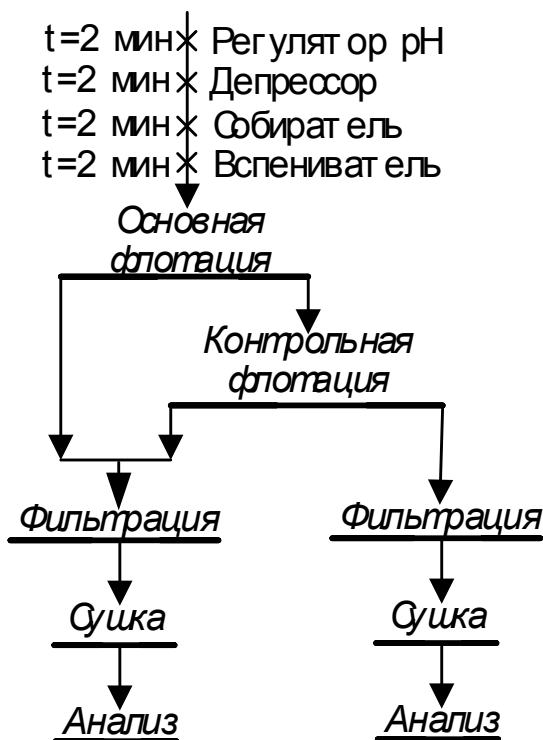


Рис. 4.5. Схема флотации естественно гидрофобных минералов

Таблица 4.1

Результаты опытов флотации сульфидных минералов

№	Реагентный режим	Продукт	$Q_i$ , г	$\gamma_i$ , %	$P_i$ , г	$\beta_i$ , %	$\varepsilon_i$ , %
1		К-т Хв. Исх.					
..		К-т Хв. Исх.					
<i>n</i>		К-т Хв. Исх.					

Результаты экспериментальных исследований заносятся в таблицу (см. таб. 4.1) и по ним строится график зависимости извлечения и содержания полезного компонента в концентрат от расхода реагентов. По полученным данным делаемся вывод об оптимальном реагентом режиме флотации.

## РАБОТА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕПРЕССОРОВ НА ФЛОТАЦИЮ СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛОВ

### Общие сведения

Депрессоры имеют очень большое значение при селективной флотации минералов с близкими флотационными свойствами. Минералы, относящиеся к одному и тому же классу (например, сульфиды), флотируются одним и тем же собирателем. Применение депрессоров позволяет увеличить селективность действия собирателя относительно таких минералов. Депрессоры препятствуют адсорбции собирателей и повышают гидрофильность поверхности минералов. Депрессоры имеют большое значение при селективной флотации минералов с близкими свойствами, т.е. когда надо выделить отдельно каждый минерал в свой концентрат.

Все применяемые в настоящее время депрессоры являются неорганическими органическими соединениями – кислотами, щелочами, солями. Механизм депрессирующего действия может быть различным. При этом происходит изменение состава поверхностного слоя минерала в ходе химической реакции.

Варианты взаимодействия следующие:

1) образование поверхностного соединения с участием ионов депрессора,

2) внедрение ионов депрессора в решетку минерала в результате ионного обмена (возможно образование пленок),

3) адсорбция ионов депрессора во внешнюю обкладку ДЭС с изменением величины заряда поверхности.

*По первому механизму* сформировавшийся гидрофобный слой собирателя на поверхности растворяется в присутствии депрессора и создаются условия, препятствующие его образованию. При этом обнажается гидрофильная поверхность минерала и его флотация прекращается. Пример: депрессирование цианидами сульфидов меди.

*По второму механизму* ионы депрессора образуют с ионами минерала трудно растворимое гидрофильное соединение (пленка, осадок). Пример: депрессия сернистым натрием галенита и других сульфидов. При перемешивании коллективного концентрата сульфидов с раствором сернистого натрия  $\text{Na}_2\text{S}$  ионы собирателя переходят в раствор, а сульфидные ионы – из раствора на поверхность минерала.

*По третьему механизму* на участках поверхности, не занятых собирателем, депрессор образует с ионами минерала гидрофильное соединение. Средняя гидрофобность минерала снижается и флотация ухудшается. Пример: депрессия хромпиком (двухромовокислый калий  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) галенита.

*По четвертому механизму* тонкодисперсные частицы закрепляются на участках, где нет собирателя. Размер этих коллоидных частиц много больше, чем ионов собирателя. Контакт слоя собирателя и поверхности пузырька нарушается. Пример: депрессия сфалерита серноокислым цинком в присутствии соды.

Наиболее широко применяют цианиды, цинковый купорос, сернистый натрий, жидкое стекло, бихроматы, щелочи, органические соединения.

**Цианиды** – соли синильной кислоты – депрессоры для пирита, сфалерита, минералов меди, серебра, ртути, никеля. Применяются цианистый натрий  $\text{NaCN}$  или цианистый калий  $\text{KCN}$  при селективной флотации медно-цинковых, свинцово-цинковых,

медно-молибденовых руд. Хорошо растворяются в воде. Гидролизуются в воде с выделением цианистого водорода, который является очень сильным ядом. Поэтому применяются только в щелочных средах, где не происходит их гидролиз. Недостатки: высокая токсичность, высокая стоимость, растворяют золото, присутствующее в рудах, необходимость глубокой нейтрализации сбросовых вод. Применение других менее опасных реагентов не дает такого высокого эффекта, который достигается при их использовании. В основе депрессирующего действия лежит их способность образовывать труднорастворимые комплексные соединения с металлами.

*Цинковый купорос*  $ZnSO_4 \times 7H_2O$  – применяется для депрессии сфалерита самостоятельно или в сочетании с цианидом. Цинковый купорос в нейтральной и щелочной средах образует осадок  $Zn(OH)_2$ , в присутствии соды - осадок  $ZnCO_3$ . Осадок налипает на поверхность минерала и депрессирует его. При использовании вместе с цианидом усиливает его депрессирующее действие образованием труднорастворимого цианида цинка  $Zn(CN)_2$ . Эта соль осаждается на поверхности минерала, гидрофилизует ее и закрывает к ней доступ собирателя.

*Сернистый натрий*  $Na_2S$  применяют при флотации сульфидных и несulfидных минералов как активатор, депрессор, сульфидизатор, десорбент собирателей, регулятор pH пульпы. В воде подвергается гидролизу и создает сильную щелочную среду. В зависимости от pH среды в пульпе могут присутствовать  $H_2S$ ,  $HS^{-1}$ ,  $S^{-2}$ , оказывающие сильное действие на минералы. Сернистые  $S^{-2}$  и гидросернистые  $HS^{-1}$  ионы адсорбируются на поверхности сульфида, в результате чего она приобретает значительный отрицательный заряд. Поэтому не могут адсорбироваться анионы собирателя. Кроме того десорбируется уже закрепившийся собиратель. Эти ионы препятствуют активизирующему действию кислорода, вытесняют с поверхности другие ионы.

*Жидкое стекло*  $(SiO_2)_m \times (Na_2O)_n$  – растворимый в воде стекловидный сплав из щелочных силикатов и кремнезема. Отношение m/n называется модулем жидкого стекла. Применяется как депрессор кварца и силикатов при флотации кальцита и

флюорита. В пульпе образует сильногидратированные мицеллы кремневой кислоты, которые закрепляются на поверхности минералов в виде коллоидных осадков и гидратируют ее. Также ионы  $\text{HSiO}_3^{-1}$ ,  $\text{SiO}_3^{-2}$ ,  $\text{OH}^{-1}$  могут вытеснять анионы собирателя, или закрепляться без их вытеснения.

*Бихроматы*  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  или  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  – депрессоры галенита. Депрессируют по третьему механизму, при высоких концентрациях – по второму. Хроматные ионы вытесняют ионы  $\text{SO}_4^{-2}$  с поверхности галенита, при высоких концентрациях – и ионы ксантогената. Образуется труднорастворимый хромат свинца. Применяют при разделении свинцово-медных сульфидных концентратов. Применение бихроматов имеет ряд технологических недостатков (потери меди в свинцовом концентрате и др.).

*Щелочи* – известь  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (гашеная) и кальцинированную соду  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  - применяют для депрессии минералов, содержащих железо. Могут депрессировать галенит, и при высоких концентрациях – все сульфиды. Используют при разделении сульфидов меди и железа, активированного сфалерита и сульфидов железа. Механизм действия – второй – вытеснение ионов собирателя с поверхности.

Органические депрессоры действуют по второму или четвертому механизму. Депрессируют силикаты и окислы железа.

Делятся на 4 класса:

1. Неионогенные – полимеры, содержащие неионогенные полярные группы  $\text{OH}$ ,  $\text{CO}$  (крахмал, целлюлоза и др.); прочно закрепляются на поверхности полярными группами - водородная связь.

2. Анионные полимеры, содержащие анионные полярные группы  $\text{COOH-}$ ,  $-\text{SO}_3\text{H}$  (карбоксиметилцеллюлозв КМЦ); закрепляются полярными группами – химическая связь.

3. Катионные – полимеры, содержащие катионные полярные группы  $-\text{NH}_2$ ,  $=\text{NH}$  (поливиниламин); слабо закрепляются на поверхности – водородная и химическая связь.

4. Амфотерные – полимеры, содержащие анионные и катионные полярные группы (гидролизированный полиакриламид,

казеин); слабо закрепляются на поверхности - водородная и химическая связь.

При обогащении полиметаллических руд, содержащих сульфиды меди, свинца цинка и железа, используют различные варианты коллективно-селективной схемы флотации. В большинстве случаев сначала проводят коллективную флотацию минералов меди и свинца из исходной руды при депрессии сфалерита и пирита с последующим разделением медно-свинцового концентрата, а затем из хвостов медно-свинцового цикла извлекают сфалерит, а иногда и пирит. Для разделения свинцово-медных концентратов используют методы, основанные как на депрессии флотации сульфидов меди, так и свинца. Выбор метода определяется, в первую очередь, вещественным составом разделяемого концентрата.

**Цель работы:** исследовать возможность разделения сульфидных минералов прямой и обратной флотацией.

**Необходимое оборудование:** аналитические весы, пневмо - механическая флотационная машина с автоматическим снятием пенного продукта (фирмы «Laarmann»), вакуум-фильтр, сушильный шкаф.

#### **Порядок выполнения работы**

Исследование процесса прямой флотации проводят на искусственной биминеральной смеси, состоящей из галенита и халькопирита или на руде, содержащей вышеназванные минералы. В качестве собирателя используется бутиловый ксантогенат калия, исследуемый депрессор халькопирита, регулятор среды - известь, вспениватель - сосновое масло. Порядок загрузки реагентов, время флотации и схема проведения опыта показаны на рисунке 5.1. Формулы для определения объема добавляемых реагентов и расчета основных показателей обогащения приведены в работе 1. Результаты экспериментальных исследований заносятся в таблицу (см. таб. 5.1) и по ним строится график зависимости извлечения и содержания галенита в концентрате от расхода депрессора.

По полученным данным делается вывод об оптимальном реагентом режиме флотации.

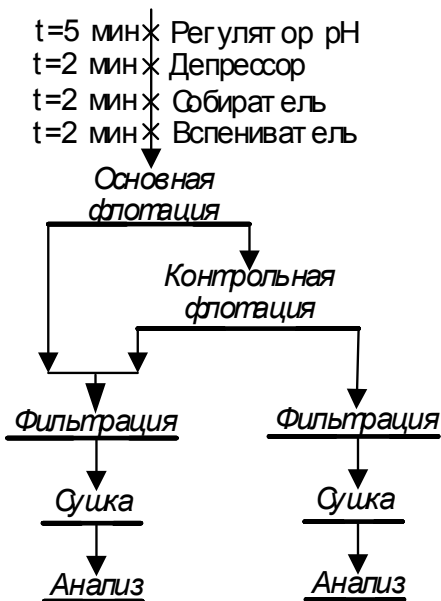


Рис. 5.1. Схема прямой флотации галенита

Таблица 5.1

Результаты опытов прямой флотации

№	Реагентный режим	Продукт	$Q_i$ , г	$\gamma_i$ , %	$P_i$ , г	$\beta_i$ , %	$\varepsilon_i$ , %
1		К-т Хв. Исх.					
<i>n</i>		К-т Хв. Исх.					

Исследование процесса обратной флотации проводят на искусственной биминеральной смеси, состоящей из галенита крупностью и халькопирита на руде, содержащей вышеназванные минералы. В качестве собирателя используется бутиловый ксантогенат калия, депрессора галенита - хромпик, вспенивателя – сосновое масло (по указанию преподавателя реагентный режим может быть изменен. Порядок загрузки реагентов, время флотации и схема проведения опыта показаны на рисунке 5.2.

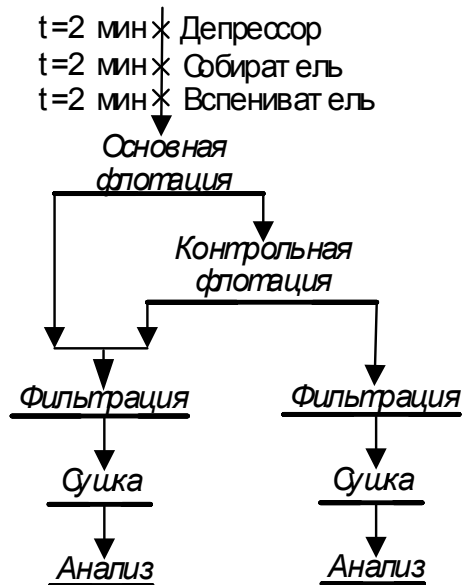


Рис. 5.2. Схема обратной флотации галенита

Формулы для определения объема добавляемых реагентов и расчета основных показателей обогащения приведены в работе 1. Результаты экспериментальных исследований заносятся в таблицу (см. таб. 5.2) и по ним строится график зависимости извлечения и содержания полезного компонента в концентрате от расхода депрессора. По полученным данным делается вывод об оптимальном реагентном режиме флотации.

Таблица 5.2

Результаты опытов обратной флотации галенита

№	Реагентный режим	Продукт	$Q_i$ , г	$\gamma_i$ , %	$P_i$ , г	$\beta_i$ , %	$\varepsilon_i$ , %
1		К-т Хв. Исх.					
$n$		К-т Хв. Исх.					



## РАБОТА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛОТАЦИИ ОКИСЛОВ МЕТАЛЛОВ

### Общие сведения

Все окислы железа могут флотироваться оксигидрильными собирателями. Флотуемость их понижается с увеличением содержания связанной воды и уменьшением плотности структуры. Гематит флотируется лучше, чем магнетит, а магнетит лучше, чем гетит. Увеличение содержания в минерале ионов трехвалентного железа способствует повышению флотуемости. Поэтому окисление магнетита кислородом воздуха при аэрации пульпы улучшает его флотуемость. Основными собирателями для окислов железа являются жирные и нафтеновые кислоты, оксикислоты и др. Так как железные руды - относительно дешевое сырье, то для их флотации применяют наиболее дешевые собиратели - побочные продукты различных отраслей промышленности, например талловое масло.

*Сырое талловое масло* состоит из смеси жирных кислот (35...40 %), смоляных кислот (40...59 %) и органических неомыляемых веществ. Жирные кислоты представлены олеиновой (32...38 %), линолевой (58 %) и линоленовой (4 %) кислотами.

*Дистиллированное талловое масло*, которое получается при вакуумной разгонке сырого талового масла, содержит до 60 % жирных кислот, в *жирнокислотной фракции* таллового масла содержание жирных кислот повышается до 90 %, а содержание смоляных кислот снижается до 2 %.

Эти собиратели обладают высокой флотационной активностью и с успехом заменяют олеиновую кислоту в виде эмульсии с содой и керосином.

Среди других заменителей олеиновой кислоты необходимо отметить *нафтеновые кислоты*, которые выделяются при перегонке нефти.

Наиболее флотоактивной является фракция, выделяемая дистилляцией при температуре 120 °С, которая содержит 68...76 % нафтеновых кислот. При флотации расход их в 2...3 раза выше расхода олеиновой кислоты, но стоимость в 9...10 раз ниже. При обработке нафтеновых кислот щелочью получается нафтеновое

мыло, которое называется *мылонафтом* и содержит не менее 43 % нафтеновых кислот.

Нафтеновые кислоты и мылонафт применяются для флотации при температурах пульпы менее 10 °С. Они имеют меньшую чувствительность к солям жесткости в жидкой фазе пульпы, обладают пенообразующими свойствами и могут заменять олеиновую кислоты при флотации окисленных минералов.

Среди других заменителей олеиновой кислоты можно отметить *синтетические жирные кислоты (СЖК)*, которые выделяются из натуральных и синтетических парафинов методом ступенчатой диссоциации. Эти кислоты являются более слабыми собирателями по сравнению с олеиновой кислотой, но значительно селективные и обладающие хорошими пенообразующими свойствами.

**Цель работы:** исследовать возможность разделения кварца и магнетита флотацией.

**Необходимое оборудование:** аналитические весы, пневмо - механическая флотационная машина с автоматическим снятием пенного продукта (фирмы «Laarmann»), вакуум-фильтр, сушильный шкаф.

#### **Порядок выполнения работы**

Исследование процесса флотации окислов железа проводят на искусственной биминеральной смеси, состоящей из магнетита крупностью и кварца или на аналогичной руде. В качестве собирателя может использоваться дистиллированное талловое масло (ДТМ), депрессора кварца - жидкое стекло, вспенивателя - ОПСБ. Порядок загрузки реагентов, время флотации и схема проведения опыта показаны на рисунке 6.1.

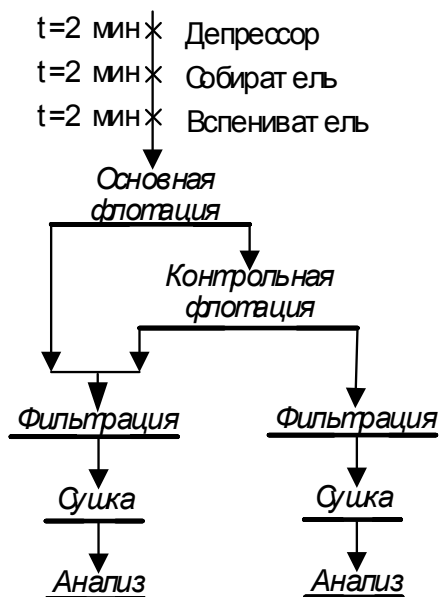


Рис. 6.1. Схема флотации магнетита

Формулы для определения объема добавляемых реагентов и расчета основных показателей обогащения приведены в работе 1. Результаты экспериментальных исследований заносятся в таблицу (см. табл. 6.1) и по ним строится график зависимости извлечения и содержания магнетита в концентрате от расхода собирателя. По полученным данным делается вывод об оптимальном реагентном режиме флотации.

Таблица 6.1

Результаты опытов окислов металлов

№	Реагентный режим	Продукт	$Q_i$ , г	$\gamma_i$ , %	$P_i$ , г	$\beta_i$ , %	$\varepsilon_i$ , %
1		К-т Хв. Исх.					
..		К-т Хв. Исх.					
<i>n</i>		К-т Хв. Исх.					

## РАБОТА 7. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ФЛОТАЦИИ

### Общие сведения

**Скорость флотации (flotation rate)** — производная по времени от извлечения ценного компонента в концентрат, характеризующая интенсивность процесса в различные периоды времени.

Скорость флотации важная технологическая характеристика процесса. Она характеризует производительность флотационных аппаратов, позволяет судить об изменениях условий флотации и анализировать их влияние на процесс. По результатам анализа можно, например, обосновать оптимальное распределение съема пены по фронту флотации, сопоставить и оценить флотируемость разных минералов в разных условиях, выявить действие тех или иных факторов флотации.

В последнем случае можно воспользоваться анализом изменения удельной скорости флотации во времени. Расчет значений удельной скорости флотации может быть проведен по уравнению К.Ф. Белоглазова, для вывода которого используют общее уравнение процесса минерализации пузырьков при флотации:

$$dx/dt = z\varphi_{\text{закр}}N(x_0 - x), \quad (7.1)$$

где  $x$  - число частиц, закрепившихся на поверхности пузырьков к моменту времени  $t$ ;  $z$  - коэффициент пропорциональности;  $\varphi_{\text{закр}}$  - коэффициент эффективности закрепления;  $N$  - число пузырьков в единице объема пульпы, способных минерализоваться;  $x_0$  - число частиц, подлежащих флотации в исходной пульпе.

Скорость  $dx/dt$  закрепления частиц на пузырьках пропорциональна числу частиц, способных прилипнуть к пузырькам  $(x_0 - x)$ , числу пузырьков  $N$  и эффективности закрепления частиц на пузырьках  $\varphi_{\text{закр}}$ .

Перенося величину  $(x_0 - x)$  влево, а  $dt$  - вправо и проинтегрировав, получим:

$$\int_0^x dx / (x_0 - x) = \ln[x_0 / (x_0 - x)] = Z \int_0^t \varphi_{\text{закр}} dt.$$

Деля числитель и знаменатель первого интеграла на  $x_0$  и заменяя  $x/x_0$  через  $\varepsilon$  (доли ед.), получим:

$$\ln[1/(1-\varepsilon)] = Z \int_0^t \varphi_{\text{закр}} dt.$$

Величина  $\ln[1/(1-\varepsilon)]$  характеризует изменение  $N$  или  $\varphi_{\text{закр}}$  под действием различных факторов и носит название *коэффициента удельной скорости флотации*.

Определение кинетики флотации имеет большое теоретическое и прикладное значение, поскольку характеризует развитие процесса флотации во времени в зависимости от различных параметров. Кинетическая модель процесса флотации необходима для разработки научных принципов расчета и конструирования новых флотационных аппаратов, обоснованного проектирования флотационных циклов и схем фабрик с учетом требований к качеству конечной продукции и извлечению ценных компонентов, построения систем управления технологическим процессом флотации в режиме автоматического регулирования.

К настоящему времени предложено множество различных видов моделей.

*Однофазная модель флотации* - наиболее распространенная упрощенная модель, изучению которой посвящено большое число экспериментальных исследований. В этом случае учитываются частицы только в одном состоянии, т.е. в состоянии свободных частиц в пульпе. Разделив обе части уравнения (7.1) на  $x_0$  и учитывая, что  $x/x_0 = \varepsilon$ , получаем:

$$d\varepsilon/dt = z\varphi_{\text{закр}}n(1-\varepsilon).$$

Если свойства флотируемого минерала и условия флотации постоянны ( $\varphi_{\text{закр}} = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ ), то

$$d\varepsilon/dt = k(1-\varepsilon), \quad (7.2)$$

т.е. скорость флотации должна быть прямо пропорциональна массе флотируемого материала  $(1-\varepsilon)$  и характеризоваться вероятностью  $k$  флотации в единицу времени, отражающей все основные этапы флотационного процесса: столкновение частиц с пузырьком  $W_c$ , закрепление на пузырьке  $W_{\text{закр}}$ , сохранение частиц на пузырьке до

выхода в пенный слой  $W_{\text{коп}}$  и удержание их в пене до съема в концентрат  $W_f$ .

Интегрируя уравнение (7.2), получим уравнение (7.3), известное как уравнение Белоглазова:

$$\varepsilon = 1 - e^{-kt}. \quad (7.3)$$

**Уравнение Белоглазова (Beloglasov's equation)** – уравнение для определения скорости флотации, представляющее зависимость извлечения минералов или металлов от времени нахождения во флотационных машинах периодического действия при допущении, что свойства флотируемых частиц одинаковы.

Если часть полезного компонента тесно связана с пустой породой (например, в виде изоморфной примеси, тонкодисперсных включений) или находится в неизвлекаемых минералах, то предельное извлечение будет менее 100 % ( $\varepsilon_n < 1$ ). В этом случае уравнение (7.3) примет вид:

$$d\varepsilon/dt = k(\varepsilon_n - \varepsilon),$$

после интегрирования которого получим:

$$\varepsilon = \varepsilon_n(1 - e^{-kt}). \quad (7.4)$$

В реальных условиях флотируемость отдельных зерен полезного минерала непостоянна, так как она зависит от многих условий: крупности и формы зерен, состояния их поверхности, наличия тонкодисперсных вкраплений пустой породы или других минералов. Кроме того, часть полезного минерала всегда находится в сродках, состав которых может быть различным. В первую очередь в пену извлекаются наиболее легко флотируемые зерна, поэтому флотируемость остающихся в пульпе частиц непрерывно понижается. Флотируемость зерен изменяется также по ходу процесса вследствие изменения концентрации реагентов в пульпе. Только по этим причинам простейшие уравнения (7.3) и (7.4) для реальных условий обычно неприменимы. Кроме того, линейность данных уравнений скорости флотации может быть нарушена флокуляцией частиц в объеме пульпы и процессами, протекающими в зоне пены.

Накопленный экспериментальный материал показывает, что кинетика флотации гораздо чаще описывается уравнением:

$$d\varepsilon/dt = k(1-\varepsilon)^n = (1-\varepsilon)k'(1-\varepsilon)^{n-1} \quad (7.5)$$

в котором показатель степени и изменяется от 1 до 6.

В реальных условиях  $\varphi_{\text{закр}}$  и  $k$  являются функцией количества и флотуемости оставшихся в пульпе зерен:

$$k \approx \varphi_{\text{закр}} \approx k'(1-\varepsilon)^{n-1}$$

Поскольку обычно  $(n-1) \geq 1$ , то очевидно, что значение  $k$  (и  $\varphi_{\text{закр}}$ ) с уменьшением доли в пульпе флотируемых зерен также уменьшается.

Заменяя в уравнении (7.5) член  $k'$  на  $f(k)$  - функцию распределения частиц по флотуемости - и интегрируя его, получим:

$$\varepsilon = \int_0^{\infty} (1 - e^{-kt}) f(k) dk. \quad (7.6)$$

Формально в ряде случаев функцию распределения частиц по флотуемости  $f(k)$  можно описать гамма-функцией. Фактически в условиях однофазной модели она зависит в основном от значения вероятности  $f(k_i)$ , флотации зерен разной крупности.

К настоящему времени показано, что общая кривая кинетики флотации в оптимальном реагентном режиме обычно является суммой кинетических прямых флотации отдельных классов. Значения  $f(k_i)$ , могут быть определены по полученным экспериментальным данным (углу наклона прямых).

Очевидно, что крупность флотационных классов должна выбираться с учетом гидродинамических параметров, оптимальный реагентный режим – обеспечиваться регулированием расхода реагентов в соответствии с физико-химической моделью процесса, извлечение - рассчитываться на основании уравнения (7.6) для  $m$  классов крупности по уравнению

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^m \varepsilon_{n_i} (1 - e^{-k_i t}). \quad (7.7)$$

Например, для трех классов крупности, доля извлекаемого компонента в которых соответственно  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , величина:

$$\varepsilon = \varepsilon_{n_1}(1 - \beta - \gamma)(1 - e^{-k_1 t}) + \varepsilon_{n_2}(1 - \alpha - \gamma)(1 - e^{-k_2 t}) + \varepsilon_{n_3}(1 - \alpha - \beta)(1 - e^{-k_3 t}).$$

Использование таких моделей позволяет на основе экспериментально полученных значений  $f(k_i)$  для выбранных классов крупности обосновывать оптимальное распределение и число операций в цикле флотации с учетом заданных технологических показателей процесса. Трудность использования более сложных однофазных моделей обусловлена сложностью расчета принятых функций распределения параметров процесса.

Зависимость  $\varepsilon=f(t)$  характеризует кинетику флотационного процесса. Производная  $d\varepsilon/dt$  равна скорости флотации в данный момент времени и определяется тангенсом угла наклона кривой  $\varepsilon=f(t)$ .

Лабораторные исследования и результаты работы флотационных фабрик показывают, что при предельном извлечении близком единице, для процесса флотации применимо уравнение:

$$d\varepsilon/dt = k(1 - \varepsilon)^p$$

где:  $k$  и  $p$  - постоянные параметры, зависящие от свойств флотируемого материала и условий флотации.

Физический смысл параметра  $k$  – скорость флотации в начальный момент. Опыты флотации в идеальных условиях (узкие классы крупности из мономинеральной пульпы при постоянной концентрации коллектора в пульпе, постоянные крупность и количество подаваемых пузырьков воздуха) показали, что в этих условиях  $p=1$  и формула принимает простой вид:

$$d\varepsilon/dt = k(1 - \varepsilon)$$

После интегрирования и преобразований это уравнение принимает вид:

$$\ln[1/(1 - \varepsilon)] = kt$$

Графическая зависимость  $\ln[1/(1 - \varepsilon)] = f(t)$  может быть прямой или кривой. Прямолинейная зависимость свидетельствует о том, что



скорость флотации в течение всего времени остается постоянной. Коэффициент  $k$  равен тангенсу угла наклона линии к оси абсцисс ( $t$ ).

**Цель работы:** исследовать влияние расхода собирателя на кинетику флотации.

**Необходимое оборудование:** аналитические весы, пневмо - механическая флотационной машине с автоматическим снятием пенного продукта (фирмы «Laarmann»), вакуум-фильтр, сушильный шкаф.

### **Порядок выполнения работы**

Исследование кинетики флотации проводят на мономинеральной фракции узкого класса крупности или реальной руде известного состава. Реагентный режим назначается преподавателем, причем задается как минимум три различных расхода собирателя. Порядок загрузки реагентов, время флотации и схема проведения опыта показаны на рисунке 7.1.

При проведении эксперимента следует особое внимание обратить на равномерность съема пены в каждом этапе флотации. Формулы для определения объема добавляемых реагентов и расчета основных показателей обогащения приведены в работе 1. Результаты экспериментальных исследований заносятся в таблицу (см. табл. 7.1) и по ним строится график скорости флотации, определяется константа скорости и делается вывод о влиянии расхода собирателя на кинетику флотации, а также подбирается аналитическая зависимость описывающая данную зависимость

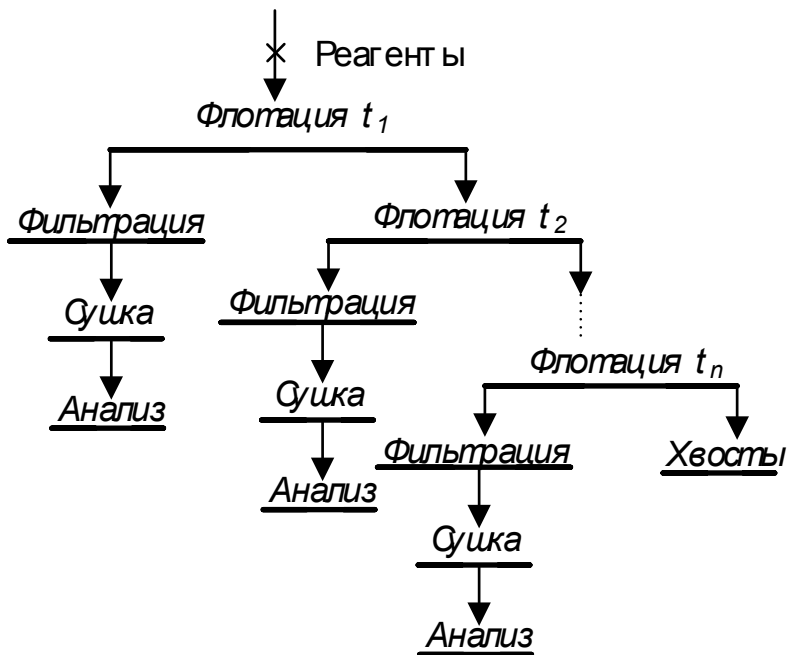


Рис. 7.1. Схема опыта по исследованию кинетики флотации

Таблица 7.1

Результаты опытов по изучению кинетики флотации

Расход собирателя, г/т	Время флотации $t$ , мин.	Продукт	Масса пр-та, г	$\varepsilon$ , %	Суммарное $\varepsilon$ , %	$\ln \frac{1}{1-\varepsilon}$
$C_1$	$t_1$	К-т 1				
	$t_2$	К-т 2				
	...	К-т 3				
	$t_n$	К-т 4				
			Хвосты			
...	$t_1$	К-т 1				
	$t_2$	К-т 2				
	.....	.....				
$C_n$	$t_1$	К-т 1				
	$t_2$	К-т 2				
	.....	.....				

## РАБОТА 8. ИССЛЕДОВАНИЕ РУДЫ НА ФЛОТИРУЕМОСТЬ

### Общие сведения

При исследовании кинетики флотационного процесса необходимо учитывать тот факт, что определение общей константы скорости флотации не отражает влияния флотационных свойств отдельных минералов, а также их степени раскрытия. Для более точного определения скорости флотационного процесса применяется метод разделения всей массы флотируемого материала на несколько классов по их скорости флотации. Физический смысл данного метода состоит в выделении класса частиц разность в вероятности закрепления их на пузырьке газа малоразличима.

Для характеристики величины флотационной способности каждого класса вводятся показатели флотируемости. Показатель флотируемости является безразмерной величиной отражающей вероятность закрепления частицы на пузырьке и дальнейшем выносе её в пенный продукт посредством истинной флотации или механическим выносом.

Таким образом, возможно получить несколько констант флотации для каждого класса исходя из следующего уравнения:

$$k = P S_b R_f$$

где:  $k$  – константа скорости флотации для класса флотируемости,  $S_b$  – показатель удельной интенсивности аэрации,  $R_f$  – выход пенного продукта.

Приняты стандартные интервалы значений показателей флотируемости для классов:

- Высокая флотируемость – 1-0,1;
- Средняя флотируемость – 0,1 -0,01;
- Низкая флотируемость – 0,01-0,001;
- Нефлотируемые частицы – 0,001 – 0.

Уточнение показателей флотируемости в основном производится их итерацией для достижения минимального расхождения значения извлечения, установленных при лабораторных экспериментах и теоретически рассчитанных значений извлечения в каждый момент времени.

Таким образом, происходит формирование набора показателей флотуемости ( $P_{i,j,k}$ ) для каждой фракции сопоставлением минерала и класса флотуемости, исходя из вышеизложенной классификации. Задать каждый показатель флотуемости исходя из диапазона характерного для данного класса и опыта флотации рассматриваемого минерала.

**Цель работы:** исследовать флотуемость пробы руды.

**Необходимое оборудование:** аналитические весы, пневмомеханическая флотомашинка JK Batch Test Flotation Machine (рис. 8.1), вакуум-фильтр, сушильный шкаф.



Рис. 8.1. JK Batch Flotation Test Machine

### **Порядок выполнения работы**

Для определения флотуемости компонентов руды необходимо произвести данный тест для каждого основного потока пульпы в исследуемой схеме. Тест проводится при следующих условиях:

- 1) Расход воздуха должен составлять 2 л/мин;

- 2) Скорость вращения импеллера должна составлять 450-600 об/мин;
- 3) Высота пены должна составлять приблизительно 1 см;
- 4) Расчёт плотности пульпы производить исходя из плотности руды ( $\rho$ ) и содержания твёрдого в пульпе равному 30% (Разжижение  $R=2,33$ ). После чего рассчитывается необходимая масса навески исходя из имеющихся в наличии камер флотомашин объёмом (1,5 л, 3 л, 6 л) по формуле:

$$m_n = V_k / (1/\rho + R)$$

Исследование флотуемости проводят на пробе руды крупности 80% класса -0,074 мм. Реагентный режим задаётся преподавателем. Схема проведения опыта аналогична схеме, представленной в работе 7, с тем исключением что исследования проводятся для времени флотации 0.5 мин, 1 мин, 2 мин, 4 мин, 6 мин, 12 мин.

Формулы для определения объема добавляемых реагентов и расчета основных показателей обогащения приведены в работе 1. Полученные значения заносятся в таблицу (см. таб. 8.1) и по ним строится график скорости флотации, определяется экспериментальная константа скорости флотации. На основании полученных результатов определяется оптимальное время флотации.

Таблица 8.1

Результаты опытов по изучению флотуемости руды

Время флотации $t$ , мин.	Продукт	Масса пр-та, г	$\varepsilon$ , %	Суммарное $\varepsilon$ , %	$\ln \frac{1}{1-\varepsilon}$
0,5	К-т 1				
1	К-т 2				
2	К-т 3				
4	К-т 4				
6					
12					
	Хвосты				

При необходимости исследование повторяется при другом реагентном режиме.

## РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абрамов А.А.* Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. Т. 1: Обогащительные процессы и аппараты. — М: Изд-во МГГУ, 2003. — 492 с.

2. *Абрамов А.А.* Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. Т. II: Технология обогащения полезных ископаемых. — М: Изд-во МГГУ, 2006. — 510 с.

3. *Абрамов А.А.* Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. Т. III. Кн. 2. Pb, Pb-Cu, Zn, Pb-Zn, Pb-Cu-Zn, Cu-Ni, Co-, Bi-, Sb-, Hg-содержащие руды. — М.: Изд-во МГГУ, 2006. — 472 с.

4. *Мелик-Гайказян В.И., Абрамов А.А., Рубинштейн Ю.Б. и др.* Методы исследования флотационного процесса. М.: Недра, 1990-300 с.

5. Теория и технология флотации руд / *Под ред. О. С. Богданова.* — М.: Недра, М.: Недра, 1990.-363 с.

6. *Шубов Л.Я., Иванков С.И., Щеглова Н.К.* Флотационные реагенты в процессах обогащения минерального сырья. Справочник: в 2-х книгах. — М.: Недра, 1990. Кн.1. — 400 с.

7. *Шубов Л.Я., Иванков С.И., Щеглова Н.К.* Флотационные реагенты в процессах обогащения минерального сырья. Справочник: в 2-х книгах. — М.: Недра, 1990. Кн.2. — 263 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
Работа 1. Определение краевого угла смачивания поверхностей различных минералов .....	4
Работа 2. Исследование флотации кальцийсодержащих минералов .....	12
Работа 3. Исследование флотации естественно-гидрофобных минералов .....	21
Работа 4. Исследование флотации сульфидных минералов .....	27
Работа 5. Исследование влияния депрессоров на флотацию сульфидных минералов .....	33
Работа 6. Исследование флотации окислов металлов .....	40
Работа 7. Исследование кинетики флотации .....	43
Работа 8. Исследование руды на флотируемость .....	50
Рекомендательный библиографический список .....	53

# **ФЛОТАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ**

*Методические указания к лабораторным работам  
для студентов специальности 21.05.04*

Сост.: *Т.Н. Александрова, А.О. Ромашев*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
обогащения полезных ископаемых

Ответственный за выпуск *Т.Н. Александрова*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 30.06.2020. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 3,0. Усл.кр.-отг. 3,0. Уч.-изд.л. 2,9. Тираж 50 экз. Заказ 456.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2