

УДК 622.765

Этапы развития флотационного обогащения руд цветных металлов

© К.А. Шаронов, А.В. Аксёнов

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

Аннотация. Целью данной работы является изучение истории развития флотационного метода обогащения полезных ископаемых, определение роли флотационного метода в современных технологических схемах. В связи с уменьшением запасов руд с высоким содержанием ценного компонента и одновременно с увеличением спроса на цветные металлы в цивилизованных, высокоиндустриальных странах была поставлена задача об извлечении металла из сравнительно бедных руд и руд с тонковкрапленным металлом. В дальнейшем это стало основной мотивацией развития современного, более эффективного метода обогащения – флотации. В настоящей публикации представлено краткое историческое описание стадий формирования флотации как основного процесса обогащения руд, содержащих цветные металлы. Описаны методы масляной, плёночной и пенной флотации. Показан ход развития процесса обогащения с начала XIX века. Представлены механизм и схемы флотации, дана формулировка флотации как процесса на основе физико-химических явлений на разделе трёх фаз – жидкая, твёрдая и газообразная. Выполнен анализ современных процессов обогащения, на основании которого сделан вывод о том, что процесс флотации является одним из важных и экономически выгодных методов обогащения руд цветных металлов.

Ключевые слова: флотация, обогащение руд, пенная флотация, сульфидная руда

Stages of development of flotation concentration of non-ferrous metal ores

© Konstantin A. Sharonov, Alexander V. Aksyonov

*Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation*

Abstract. The aim of the article is to study the history of the development of the flotation method of mineral processing, to determine the role of the flotation method in modern technological schemes. In connection with a decrease in reserves of ores with a high content of a valuable component and simultaneously with an increase in demand for non-ferrous metals in civilized, highly industrial countries, the task was set to extract metal from relatively poor ores and ores with finely disseminated metal. In the future, this became the main motivation for the development of the modern, more effective method of enrichment - flotation. The article provides a brief historical description of the stages of flotation formation as the main process of beneficiation of ores containing non-ferrous metals. The article describes the methods of oil, film and foam flotation, showing the progress of the enrichment process since the early 19th century. It presents the mechanism and schemes of flotation, gives the formulation of flotation as a process based on physicochemical phenomena at the separation of three phases - liquid, solid and gaseous. The article analyzes modern enrichment processes, on the basis of which it is concluded that the flotation process is one of the most important and economically beneficial methods of enrichment of non-ferrous metal ores.

Keywords: flotation, ore beneficiation, froth flotation, sulphide ore

Флотация быстро заняла ведущее место в обогащении полезных ископаемых и заменила устаревшие, менее эффективные методы обогащения руд, стремительно увеличила уровень извлечения ценного компонента. В связи с этим процесс флотации оказал значительное воздействие на методы горных разработок и на металлургию. Металлургия быстро перешла с переработки исходной руды на более правильное и бюджетное обогащение концентратов.

Процесс флотации (такой, какой он есть сейчас) существует в современном виде около 50 лет и на протяжении всего существования постоянно развивается. Большая часть того, что практиковали на начальных этапах развития флотационных процессов, больше не используется на практике¹.

Однако всё то, чего достигли на ранних

¹ Полькин С.И. Обогащение руд. М.: Metallurgizdat, 1953. 395 с.

периодах развития, до сих пор имеет большое значение и представляет практический интерес.

Использование метода разделения частиц минералов, который основан, подобно флотации, на прилипанию, относится к далёкому прошлому. Ещё во времена V века до н.э. знали о свойстве масла покрывать металлические частицы, существуют описания этого процесса.

В этих описаниях говорится об извлечении частиц золота из песка с помощью гусиных перьев, смазанных жиром. Процесс извлечения состоял в избирательном прилипанию частиц золота к жиру.

В 15 в. н.э. для извлечения азурита (медной руды) арабами применялся процесс, состоящий в том, что минерал прилипал к размягчённой смоле и затем всплывал в ней. Прошло много лет, пока из данного свойства «прилипания» извлекаемых частиц к жиру развился используемый в настоящее время флотационный процесс.

Официальная дата основания флотации как процесса обогащения – 23 августа 1860 г., в этот день был выдан патент В. Хайнсу в Англии, который назывался «Метод концентрации металлов из руд и пород» [1]. Хайнс предложил способ разделения сульфидных минералов и минералов пустой породы при обработке их маслом. Сульфиды, обволакиваясь маслом, отделялись от пустой породы, которая падала на дно. Этот процесс ещё не был истинной флотацией, но всё-таки был предшественником флотационного процесса, получившего в дальнейшем название «масляной флотации». Процесс скоро был отвергнут из-за высокого расхода масла, составляющего 10–20 % от веса руды.

В августе 1885 г. флотационный процесс, основой которого было масло, был модернизирован американкой Карри Эверсон при помощи добавления в процесс кислоты и изменения количества масла в процессе флотации (от 6 до 20 %). На данное усовершенствование был выдан патент. В нём описано свойство мелкоизмельчённой сульфидной руды, заключающееся в поглощении масла животного, минерального и растительного происхождения в присутствии подкисленной воды. Несмотря на всю важность открытия Эверсон, на него не было обращено должного внимания, так как в то время в Америке в плавку шла богатая руда и не было мотивов к тому, чтобы обогащать

бедные руды с применением для этого довольно сложного метода обогащения.

Следующим этапом развития флотационного процесса было параллельное, независимое друг от друга развитие газового (С.В. Поттер – январь 1902 г.) и масляного (Г.П. Дельпрат – ноябрь 1902 г.) способов флотации. Эти два способа были очень схожими: происходило всплывание создающихся пузырьков углекислоты, полученных при разложении карбонатов кислотой при нагревании. Единственное отличие было в том, что Г.П. Дельпрат применял сернокислые соли. В дальнейшем Поттер и Дельпрат после небольшого изменения модернизировали свои методы и создали новый объединённый способ, известный как метод «Поттера–Делпрата».

В июне 1902 г. итальянец А. Фромент сделал важное наблюдение, заключающееся в том, что в присутствии малого количества масла при перемешивании сульфидных минералов с водой происходил подъём сульфидных минералов не только благодаря свойствам масла, но и газа. Было отмечено, что сульфиды, покрытые маслом, способны присоединяться к пузырькам газа. Главным недостатком масляной флотации был высокий расход масла, что делало данный процесс очень дорогостоящим и долгим, но благодаря открытию итальянца Фромента удалось значительно сократить расход масла, что способствовало расширению области применения флотационного процесса.

Данный способ Фромент запатентовал в Англии и Италии, но в 1903 г. патент был продан в Лондоне обществу «Минералс Сепарейшн». Это общество было основано в 1903 г. несколькими крупными инженерами-обогащателями (И. Баллот, И.Х. Керли, В.В. Уебстер, С. Грегори, И.Л. Зульман, Х.Ф. Пикард).

Фирма «Минералс Сепарейшн» оказала влияние на процесс формирования пенной флотации, в 1905 г. был получен «базисный патент», который был направлен на монополизацию всех разработок в области флотации.

Новый способ заключался в применении воздуха, который всасывается из атмосферы, а также в потреблении небольших расходов кислоты и масел.

Этот способ назвали агитационным флотационным методом, который являлся первым подобием современной флотации.

В последующие годы были разработаны соответствующие аппараты для агитационного процесса.

В 1906 г. Н.Л. Салман, Н.Ф. Пикар, И. Балло было предложено вводить газ (воздух) напрямую в пульпу при помощи

вращающегося импеллера. Именно этот способ является современным методом пенной флотации.

На рисунке 1 представлен процесс флотации во флотационной машине с вращающимся импеллером.

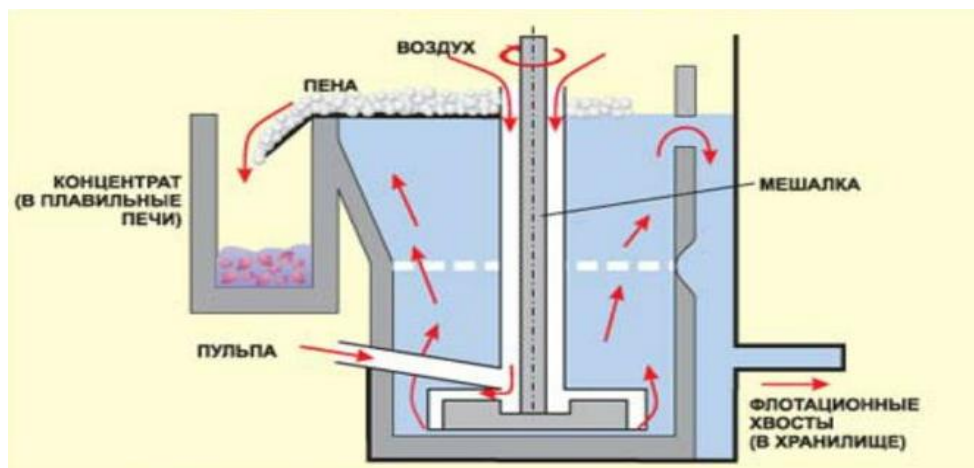


Рис. 1. Флотационная машина

Механизм пенной флотации (сепарации, рис. 2) заключается в способности поверхностно-активных веществ адсорбироваться на границе раздела жидкость-газ. Поднимающиеся на поверхность пузырьки должны формировать сравнительно устойчивую пену, именно в этой пене накапливается из-

влекаемый главный компонент. Образовавшаяся в результате пена обычно самопроизвольно переливается из камеры флотационной машины и после разрушения образует верхний (обогащенный или пенный) продукт.

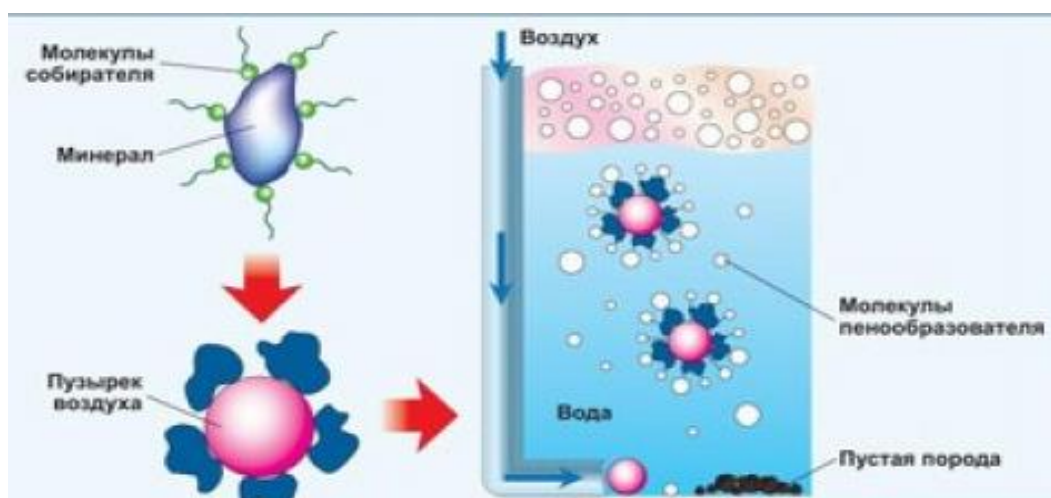


Рис. 2. Механизм пенной флотации

Схемы флотации зависят от флотационных свойств обогащаемого материала и от требований, предъявляемых к качеству концентратов и отходов (хвостов) флотации [2]. Обычно приходится последовательно повышать качество концентратов путём применения перечистных операций и доизвлекать из хвостов полезные компоненты применением серии контрольных флотаций.

Наиболее сложным является установление выгодных способов перефлотации промежуточных продуктов. Существует два принципиально различных приёма их флотации: в замкнутом цикле с первоначальными циклами флотации (рис. 3а) и в отдельном (открытом) цикле (рис. 3б) [3]. На рисунке 3 изображены стандартные схемы флотации в замкнутом и открытом циклах.

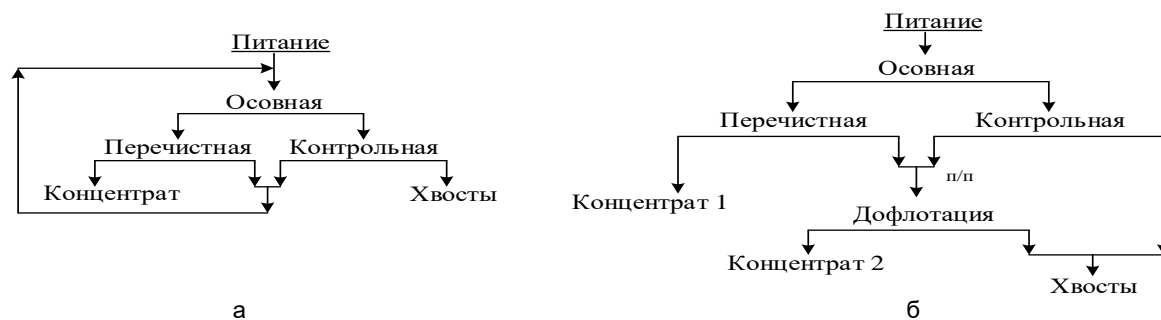


Рис. 3. Схема флотации: а – в замкнутом цикле с первоначальными циклами, б – в отдельном (открытом) цикле

На сегодняшний день существует множество технологических схем флотации, вариация которых в первую очередь зависит от минерального состава обогащаемой руды. Во флотационном обогащении существуют три основные операции: *основная*, служащая для получения черного концентрата, *контрольная*, предназначенная для доизвлечения металла из хвостов основной флотации, и *перечистная* флотация, которая необходима для повышения качества получаемого черного концентрата.

Основные различия во флотационных схемах заключаются в разном числе стадий обогащения, числе циклов обогащения и назначения отдельных стадий и циклов, которые определяют принципиальную схему флотации. Число стадий схемы флотации делится на одно-, двух- и многостадийные. Стадия флотации может включать несколько циклов.

Пенная флотация обладает такими главными преимуществами, как высокая экономичность и скорость, которая достигается благодаря меньшим затратам на электроэнергию, затраченную на процесс проведения разделения частиц².

Флотация быстро превратилась в главный процесс обогащения тонковкрапленных руд цветных металлов и некоторых других цветных металлов.

После совершенствования и обширного внедрения способа подачи воздуха в пульпу в процессе флотации важнейшим этапом является возникновение избирательного разделения сульфидных минералов (с 1912 г.) и неметаллических полезных ископаемых (с 1935 г.).

Изначально считалось, что флотация – это процессы обогащения, при которых происходит подъем на поверхность более тяжелых частиц, чем вода. Если эти частицы собираются в слое масла или на поверхно-

сти раздела слоев масла и воды, то такой процесс называется масляной флотацией. Если частицы всплывают на свободной поверхности и образуют там пленку толщиной в одну частицу, то процесс называется пленочной флотацией³. Если частицы удерживались на поверхности пульпы в виде слоя пены, то процесс называется пенной флотацией. Из всех выше перечисленных процессов в настоящее время в цветной металлургии применяется только пенная флотация.

Флотация является наиболее совершенным и перспективным методом обогащения полезных ископаемых из всех других методов обогащения. С появлением флотационного метода обогащения руд стало возможным рационально использовать полиметаллические руды, а также комплексно использовать месторождения.

Современные флотационные машины снабжены автоматизированными системами управления, что позволяет более эффективно справляться с поставленными задачами – получать качественные концентраты за счет контроля подачи питания, реагентов и воздуха.

Важнейшее значение в развитии эффективности флотационного обогащения имеет подбор флотационных реагентов, обеспечивающих желательное изменение поверхностей минералов в пульпе, контроль pH среды и пр. Современные разработки в области синтеза новых флотационных реагентов направлены на создание собирателей, активаторов, аэрофлотов, депрессоров и т. д., позволяющих наиболее селективно выделять ценные компоненты с минимальным расходом.

² Глембоцкий В.А., Классен В.И. Флотационные методы обогащения: учебник для вузов. М.: Недра, 1981. 304 с.

³ Ясюкевич С.И. Обогащение руд. М.: Металлургиздат, 1953. 516 с.

Наряду с современными реагентными режимами использование новейшего флотационного оборудования (флотомашин) предсказывает эффективность флотационных технологий. Для флотации тонкодисперсных руд весьма эффективно применение флотационных машин, использующих микропузырьки воздуха, которые находят широкое применение в технологиях флотационного обогащения руд цветных металлов.

В данное время в связи с развитием технологий флотационного обогащения полезных ископаемых на смену приходят более современные флотомшины: пневматические флотационные машины – колонные, Jameson Cell (с высокой производительностью и мобильностью в сложных технологических схемах и нестабильных потоках пульпы), Pneumotlot (её применяют для флотации угля, железной руды и руд цветных металлов), Imhoflot G-Cell (отличается самым коротким временем флотации – около 30 с). В результате высокой эффективности они способны получать конечный концентрат за одну стадию флотации, заменяя несколько стадий перемешивающей флотации в машинах механического типа [4].

Весьма эффективны специальные конструкции флотомшины фирмы Outotec типа SkimAir для скоростной флотации и Flash Roughing для использования в цикле измельчения. Скоростная песковая флотация с немалым успехом применяется при извлечении золота. Флотомшина SkimAir обеспечивает флотацию свободных крупных частиц из циркуляционной нагрузки цикла измельчения и не приводит к их дальнейшему переизмельчению. Флотомшина SkimAir

позволяет извлекать немалое количество ценных минералов ещё на стадии измельчения, в результате чего обеспечивается более стабильное питание традиционного контура флотации.

Также на конструирование усовершенствованной флотационной аппаратуры и установление ряда других факторов, способствующих получению наиболее высококачественных концентратов и максимальному извлечению металлов из руд.

В настоящее время флотационные методы обогащения широко используются при переработке золотосодержащих руд [5–9]. Немаловажную роль играет выбор оптимальной технологии обогащения, которая, в свою очередь, значительно сокращает затраты на переработку золотосодержащих концентратов в металлургических процессах [10].

Таким образом, в результате анализа исторических данных можно сделать выводы о важности флотационного процесса обогащения руд цветных металлов. Флотация является одним из основных производственных процессов обогащения большинства природных ресурсов. В наше время флотационный метод приобретает всё большее значение, так как именно его применение способствует обогащению немагнитной и тонковкрапленной руды с многокомпонентным вещественным составом, которая не поддаётся другим классическим методам обогащения. Также флотация применяется для очистки сточных вод от масложировых и взвешенных веществ, кроме этого, флотация используется в других областях промышленности для разрешения ряда важных операций [11].

Библиографический список

1. Иванков С.И. Пути развития флотационного процесса обогащения минерального сырья. М.: ЛЕНАНД, 2015. 152 с.
2. Годэн А.М. Флотация. М.: Госгортехиздат, 1959. 652 с.
3. Ковалев В.Н., Голиков В.В., Рылов Н.В. Особенности разработки технологических схем обогащения углеродсодержащих золотосульфидных руд // Вестник Сибирского федерального университета. Химия. 2017. Т. 10. № 1. С. 99–109.
4. Секисов А.Г., Кондратьев С.А., Лавров А.Ю., Петухова А.А. Комбинированный (флотационно-электрофлотационный) способ переработки сульфидных руд, склонных к шламообразованию // Кулагинские чтения: 9-я Всероссий-

ская науч.-практ. конф. (г. Чита, 30 ноября – 1 декабря 2009 г.). Чита: ЧитГУ, 2009. Ч. 7. С. 160–162.

5. Богудлова А.И., Войлошников Г.И., Матвеева Т.Н. Повышение эффективности переработки золотосодержащей сульфидной руды // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 12. С. 195–202.

6. Сосипаторов А.И., Панченко Г.М., Чикин А.И., Высотин В.В., Винокурова М.А., Коблов А.Ю. К вопросу о депрессии углерода при флотации углистых золотосодержащих руд // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 2. С. 155–162.

7. Тусупбаев Н.К., Рулев Н.Н., Семушкина Л.В., Нарбекова С.М. Интенсификация флотации техногенного золотосодержащего сырья с

применением модифицированного пенообразователя // Обогащение руд. 2019. № 2.

8. Александрова Т.Н. Ключевые направления переработки углеродистых пород // Записки Горного института. 2016. Т. 220. С. 568–572. <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.4.568>

9. Амдур А.М., Павлов В.В., Федоров С.А. Флотация дисперсных капель золота и штейна в расплавах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 3-1. С. 399–409.

10. Комогорцев Б.В., Вареничев А.А. Совершенствование технологий флотационного обо-

гащения тонкодисперсных сульфидных золото-содержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 10. С. 180–190.

11. Бухоров Ш.Б., Кодиров Х.И., Абдикамалова А.Б., Эшметов И.Д. Значение флотационного процесса, исследование флотационных реагентов и механизмов их действия на поверхности раздела фаз // Universum: химия и биология. 2020. № 9 (75). [Электронный ресурс]. URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/10620> (08.04.2021).

Сведения об авторах / Information about the Authors

Шаронов Константин Андреевич,
магистрант,
Институт высоких технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Рос-
сийская Федерация,
e-mail: shark.777@mail.ru

Konstantin A. Sharonov,
Postgraduate,
Institute of High Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian
Federation,
e-mail: shark.777@mail.ru

Аксёнов Александр Владимирович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры металлургии цветных ме-
таллов,
Институт высоких технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Рос-
сийская Федерация,
e-mail: aksenov@tomsmineal.ru

Alexander V. Aksyonov,
Cand. Sci. (Technical Sciences),
Associate Professor at Metallurgy of Non-
Ferrous Metals Department,
Institute of High Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian
Federation,
e-mail: aksenov@tomsmineal.ru