Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института, том XXXII, вып. 3, 1956 г.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФЛОТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА[1]

Проф. *К. Ф. Белоглазов*

В настоящем докладе я буду излагать только вопросы моей работы [1], затрагивая многочисленные труды других советских исследователей лишь в той мере, в какой мне пришлось использовать их в процессе моих исследований.

Но прежде чем перейти к изложению основных положений моей книги, необходимо еще раз условиться о значении термина «теория флотационного процесса».

Под этим названием в литературе встречается очень много работ, часть которых содержит иногда превосходные по своей научности трактовки физики или физико-химии какого-либо гипотетического механизма главного звена процесса флотации или, как у нас принято говорить, элементарного акта флотации. Главным недостатком работ этого вида является, как давно уже констатировано, отрыв этого акта от практики флотации и анализ его вне мира фактов объективной реальности. Авторы, повидимому, полагают, что трудную задачу увязки бесспорных научных выводов с практикой должен разрешить кто-то другой, например технологи. В результате блестяще разработанная теория остается неиспользованной, а технологи, преклоняясь перед достижениями науки, пребывают в неведении, каким путем можно эти изумительные достижения принять как руководство к действию в их неустанном труде.

Другая обширная группа работ, обычно под более осторожным наименованием — вопросы теории флотации, содержит иногда блестящие исследования отдельно взятых основных или побочных звеньев процесса (например, адсорбции коллектора на минералах, явления депрессии и активации, работы машины и т. п.). Сюда же относится и огромное число специальных технологических работ, в которых путем непосредственных опытов флотации на реальных объектах проводятся превосходные исследования влияния ионного состава пульпы, крупности материала, плотности среды и других насущных вопросов.

Эта группа работ приносит непосредственную, иногда исключительно ценную, помощь фабрикам в решении конкретных задач, стоящих перед ними. Вместе с тем, эти работы, не давая теории флотационного процесса как такового, когда их берут отдельно, в совокупности своей служат базой, на которой подобная теория может быть создана.

Под теорией флотационного процесса условимся понимать только такую концепцию, которая, принимая хотя бы гипотетическое, но вероятное объяснение основного механизма процесса, позволяет количественно с

[1] Стенограмма доклада, прочитанного на семинаре-дискуссии по теории флотационного процесса в Ленинградском горном институте в марте 1951 г.

большей или меньшей точностью предугадывать течение флотационного процесса во времени при изменении его условий или при воздействии на одно или несколько звеньев, составляющих процесс. Только такая теория позволит сознательно управлять процессом на фабрике и сокращать до минимума число контрольных опытов.

Единственным критерием правильности такой теории может служить только количественное совпадение предсказания с фактами практики, т. е. результатами флотационного опыта.

Моя книга и представляет попытку построения такой теории процесса, поэтому я и дал ей подзаголовок «Опыт теории флотационного процесса», который редакция издательства сняла, считая его почему-то уничижительным.

Напоминаю, что я кончил свою работу и сдал в редакцию в июле 1944 г., а потому книга значительно состарилась, в ней нет увязки с нашими исключительными научными и практическими достижениями послевоенного периода.

Остановлюсь только на некоторых разделах книги и более детально опишу тот путь, который привел меня к гипотезе молекулярного механизма прикрепления частицы к пузырьку, гипотезе, которая, как мне говорят, считается особенно криминальной.

Скорость процесса

Всякий технологический процесс есть целеустремленная неразрывная последовательность во времени (или частично одновременных) взаимосвязанных звеньев (основных или побочных), каждое из которых представляет собой механический, физический, химический, физико-химический или коллоидный процесс.

Связь процесса со временем является основной для технолога. Без знания закономерности этой связи, т. е. без знания кинетики процесса, невозможно никакое сознательное управление им на фабрике. О ходе процесса нельзя судить по его конечному результату без учета времени.

Так как в пенном процессе руда и воздух поступают в дисперсном состоянии, то результат его во времени слагается из огромного числа микрособытий: столкновений пузырьков и частиц, столкновений, которые в благоприятных случаях связывают частицы с пузырьками воздуха и в виде таких комплексов частицы переносятся пузырьками в пену.

Достаточно сказать, что на современной фабрике во флотационные машины непрерывным потоком поступает иногда более тысячи миллиардов частиц в одну секунду. При таком большом числе частиц и пузырьков газа скорость процесса в первом приближении можно выразить чисто статистически, учитывая вероятность благоприятных микрособытий.

Так, если принять, что в пульпе содержится $n-x$ частиц, где x—число частиц, отфлотированных к моменту времени t, и если через пульпу непрерывным потоком проходит в единицу времени N пузырьков воздуха, то за элемент времени dt отфлотируется dx частиц. Это количество будет функцией от $KN(n-x)dt$, т. е. вероятного числа столкновений и величины φ, которая учитывает долю благоприятных столкновений.

Отсюда

$$= KN(n - x)\varphi dt.$$

В интегральной форме уравнение принимает вид

$$\ln\frac{n}{n-x} = \ln\frac{1}{1-\frac{x}{n}} = \ln\frac{1}{1-\varepsilon} = K\int_0^t N\varphi\, dt,$$

где ε — извлечение минерала;

K — постоянная машины.

Это уравнение, взятое отдельно, конечно, не может нам оказать существенной помощи, так как без знания зависимости N и φ от времени использовать его нельзя.

Когда значения N и φ сохраняются постоянными в течение опыта, уравнение принимает вид

$$\lg\frac{1}{1-\varepsilon} = K_z t.$$

По утверждению Х. Зунига, это уравнение подтвердилось результатами многих фабричных и лабораторных работ [10].

К такому же выводу пришел Г. А. Осолодков при анализе работы флотационных машин на окисленной медной руде [2].

Общее уравнение оказывается весьма полезным при сравнении показаний нескольких опытов, когда варьирует только один параметр (условие) при сохранении прочих параметров постоянными.

Так, если два опыта флотации одного и того же материала, в одной и той же машине, при одном и том же количестве пенообразователя (что обеспечивает постоянство K и N) будут проведены при разных расходах коллектора, то изменение $\lg\frac{1}{1-\varepsilon}$ во времени будет, несомненно, характеризовать относительное изменение φ. Таким же путем получаем возможность по опытам флотации следить за влиянием на величину φ и различных реагентов.

Как показал анализ простейших опытов флотации, когда отсутствуют вторичные явления, нарушающие течение процесса, величина φ, которую я называл «прочностью прикрепления», резко зависит от качества и количества коллектора, изменяясь вместе с плотностью адсорбционного слоя коллектора на минерале.

Чтобы, исходя из общего статистического уравнения, можно было найти связь скорости флотации с условиями опыта, необходимо задаться хотя бы гипотетической зависимостью прочности прикрепления частицы к пузырьку, т. е. величины φ, от плотности адсорбционного слоя коллектора и других условий опыта. Иными словами, необходимо располагать сведениями о том механизме, который определяет прочность связей между частицей и пузырьком.

Всякий технологический процесс базируется на использовании потенциальной или свободной энергии. Такое использование свободной энергии осуществляется главным определяющим звеном технологического процесса.

Флотационный процесс во всех его формах базируется на использовании свободной энергии границы двух фаз.

Масляная флотация использует энергию границы масло — вода. Механизм ее есть явление самопроизвольного сокращения площади этой границы при соприкосновении слоев масла на частице и на пузырьке газа или явление коалесценции.

Пленочная флотация использует энергию границы вода — воздух. Механизм сводится к разрыву и деформации границы жидкость — газ, слабо смачиваемой сухой частицей достаточно большого размера.

Оба указанных механизма отличаются жесткостью и с трудом поддаются управлению.

Механизм пленочной флотации сухих частиц — наиболее наглядный, макроскопический, легко доступный изучению — подвергся детальному исследованию советских ученых в большом числе крупных и широко известных работ. Этот механизм, как сказано выше, сводится к деформации спокойной или ламинарно движущейся поверхности воды с образованием на частицах гистерезисно-равновесных углов контакта.

Под названием теории краевых углов или теории смачивания этот механизм у нас принят как официальная «теория» пенной флотации и излагается в наших учебниках.

Я не знаю ни одной попытки построения связной теории, которая показала бы, как, располагая знаниями изотермы смачивания, можно количественно объяснять или направлять процесс фабричной флотации. Даже в учебниках более или менее полное изложение теории смачивания всегда совершенно оторвано от дальнейшего анализа процесса флотации и не имеет с этим анализом никакой связи.

Уже в 1922 г. были высказаны предположения о том, что механизм пенной флотации принципиально отличен от механизма пленочной флотации [9]. В 1930 г. появились результаты микроскопического исследования структуры минерализованной пены, которые показали, что частицы не прорывают поверхности пузырька газа.

Отсутствие связи между равновесным углом контакта и флотируемостью минерала сделалось известно в нашей литературе уже давно. Так, в переводе учебника А. Годэна «Флотация» (1934 г.) на стр. 35 читаем без всяких замечаний редактора: «...уравнение краевого угла (уравнение Неймана) в настоящее время не имеет практического значения ...но в прежнее время (ссылка автора на работу Ральстона, 1916. — *К. Б.*) оно количественно выражало отношения между углами смачивания (т. е. равновесными углами контакта) и результатами флотации».

В 1940 г. в СССР была опубликована интересная работа О. С. Богданова и М. И. Филановского, в которой приведены результаты микроскопических наблюдений за поведением частиц и пузырьков воздуха (с помощью киносъемки) [3]. Авторы четко формулировали положение о том, что частицы, прикрепляясь к относительно большому пузырьку, не проникают внутрь его, т. е. не разрывают границу жидкость — газ. Углы прикрепления для малых частиц выражаются минутами дуги, что согласуется с данными ранее опубликованной солидной работы З. В. Волковой [4]. Только через 8 лет, в 1948 г., появилась работа Спедден и Гаднам, которая полностью подтвердила эти положения [11].

Из приведенных данных вытекало различие механизма пенной флотации и пленочного процесса. В то время как в пленочном процессе твердое тело, слабо смачиваемое данной жидкостью, плавает на поверхности раздела жидкость — газ с образованием равновесных углов смачивания, частица в пенной флотации, прикрепляясь к пузырьку, образует углы закрепления, далекие от равновесных. Кажется, И. В. Уорк был виновником путаницы, так как именно он понятие о равновесном краевом угле пузырька или капли жидкости на неограниченной поверхности твердого тела распространил и на углы закрепления частицы малого размера к пузырьку. Эти измеряемые углы закрепления для малых частиц определяются чисто геометрически, ибо синус угла закрепления равен отношению радиу-

сов частицы и пузырька совершенно вне всякой зависимости от природы твердой поверхности и от величины равновесного угла контакта — этой важной характеристики физико-химических свойств и строения поверхностного слоя, как было доказано замечательными работами акад. П. А. Ребиндера [7].

М. А. Эйгелес формулирует этот разрыв между углом закрепления частиц и равновесным углом контакта в резкой форме: «Изучение сил и условий закрепления пузырька на неограниченной по отношению к нему (пузырьку) минеральной поверхности, широко применявшееся до сих пор для оценки флотируемости минералов, не может заменить изучение сил закрепления частиц реальных флотационных размеров на пузырьке» [8].

Не следует забывать также, что закрепление частицы капиллярным механизмом соответствует по расчету огромным силам прикрепления. Так, даже при угле прикрепления, равном только 1°, и частице поперечником в 50 μ (например, барита) вектор поверхностного натяжения воды, которым предлагается определять силу прикрепления, почти в 50 раз больше силы тяжести.

В современной пенной флотации механизм прикрепления должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Механизм прикрепления должен быть мгновенно действующим, так как длительность соприкосновения частицы с большим пузырьком невелика. Так, если верить расчетам М. А. Эйгелеса [8], время скольжения частицы по пузырьку составляет 0,004—0,008 сек. За эти тысячные доли секунды механизм прикрепления или действует, или нет.

Расчеты проф. М. А. Эйгелеса относятся к случаю падения частицы и подъему пузырька с постоянной скоростью, установившимся движением. Если принять во внимание полное динамики турбулентное движение и частиц и пузырьков в пульпе с постоянными мгновенными изменениями скоростей движения под воздействием вихрей и ударов, а также пульсацию самого пузырька, когда он по всей поверхности непрерывно меняет свою кривизну, то приходится отбрасывать все предположения о возможности *реализации даже таких механизмов прикрепления, которые требуют* десятых долей секунды, по крайней мере в простейших (чистых) случаях процесса.

Кратковременность действия механизма прикрепления косвенно доказывается и тем, что весьма эффективным воздействием на скорость процесса при заданной рецептуре оказывается увеличение числа пузырьков воздуха, проходящих через пульпу (т. е. количество воздуха и его диспергация), когда явления прикрепления реализуются с большей частотой. Это блестяще доказано работой К. А. и В. А. Рундквист.

2. Механизм прикрепления в простейшем случае процесса не может быть жестким, необратимым. Как известно, связи между частицами и пузырьками легко разрушаются. Если бы этого не было, если бы связи были очень устойчивыми, то селективная флотация была бы невозможной.

Применение очень высоких расходов некоторых коллекторов и трудно растворимых пенообразователей приводит к большим затруднениям и вынуждает обращаться к помощи термической или химической обработки основного концентрата перед перечисткой или селективной флотацией. В этом случае механизм прикрепления становится жестким. Возможно, что жесткость прикрепления возникает и в этих случаях только в пене, где быстро создаются ультравысокие концентрации реагентов. Вероятно, в самой пульпе механизм остается таким же гибким, динамичным, как и в нормальном процессе.

Частица минерала, раньше чем попасть в пену, может сотни раз в секунду связываться с новыми пузырьками воздуха, каждый из которых перемещает ее (в удачном случае) в направлении к месту относительного покоя в пене.

Для более правильного понимания бурного процесса флотации и разрешения многих споров было бы очень полезно дальнейшее развитие работ О. С. Богданова и М. И. Филановского с все более и более совершенными приемами киносъемки в реальной флотационной пульпе. Этот путь проникновения в загадки процесса, несомненно, самый действенный и наглядный. Он быстро позволит отбирать все ценное из множества гипотез, создаваемых на базе умозрения, тонкой термодинамики или микроопытов, проведенных в условиях чистой мертвой статики.

3. Давно уже стало общепризнанным, что современная пенная флотация не реализуема без введения коллекторов — веществ, придающих зернам флотируемость, и поэтому механизм прикрепления неразрывно связан с коллектором.

В простейшем случае флотации необходимый расход коллектора и исходная его концентрация в пульпе поразительно малы. Как было показано С. С. Петровым в его замечательной, к сожалению, не опубликованной работе (Изучение скорости флотации руд цветных металлов, 1940), флотация реальной чистой руды протекает успешно при расходах бутилового ксантата 2,5 *г/м*^{3} и соснового масла 5 *г/м*^{3}.

Отсюда следует, что коллектор участвует в прикреплении частицы к пузырьку в виде отдельных молекул, а потому и механизм прикрепления должен быть молекулярным.

Перечисленным выше требованиям удовлетворяет механизм адсорбции на границе жидкость — воздух неполярных концов молекул коллектора, прикрепленных полярными концами к частице (подобная гипотеза была предложена еще в 1924 г. для объяснения стабилизации пены частицами минерала).

Такой молекулярный механизм закрепления частиц является связующим звеном между флотацией частиц малого размера и адсорбцией свободных молекул, например молекул пенообразователя на границе жидкость — газ, а также флотацией органических коллоидов.

Этот молекулярный механизм, количественные закономерности которого в первом приближении достаточно хорошо освещены, и положен мною в основу расчета прочности прикрепления.

Энергетическая трактовка молекулярного механизма прикрепления

Как известно, молекулы многих полярно-неполярных веществ, например пенообразователей, находясь в водном растворе, способны с очень большой скоростью самопроизвольно накопляться, адсорбироваться на границе раствор — воздух, образуя ориентированный монослой, так как все молекулы в монослое занимают положение нормальное к границе жидкость — газ аполярными концами в воздух.

Эта адсорбция сопровождается падением запаса свободной энергии поверхности раздела фаз, а потому для вывода молекул из слоя внутрь раствора необходима затрата работы. Величина работы десорбции в первом приближении выражается равенством

$$L = RT \ln (0{,}69ab),$$

где L — работа, необходимая для вывода из монослоя одной граммолекулы адсорбированного вещества;

R — универсальная газовая постоянная;

T — температура;

a и b — капиллярные постоянные вещества, определяемые уравнением Шишковского, выражающим свободную поверхностную энергию раствора σ, как функцию от концентрации C растворенного вещества.

$$\sigma = \sigma_0 - a \ln (bC + 1),$$

где σ_0 — свободная поверхностная энергия воды.

Многие простейшие коллекторы адсорбируются самопроизвольно на границе минерал — раствор с образованием ориентированного монослоя с неполярными концами в растворе. Эта адсорбция в простейшей своей форме описывается уравнением изотермы.

$$m = \frac{\Gamma_\infty \gamma C}{\gamma C + 1},$$

где m — плотность адсорбционного слоя — число граммолекул на единицу площади поверхности твердого тела;

Γ_∞ и γ — адсорбционные постоянные вещества;

C — концентрация вещества в растворе.

Когда частица, армированная таким монослоем, сталкивается с пузырьком, то по крайней мере часть ориентированных молекул коллектора на площади соприкосновения частицы с пузырьком проникает своими аполярными концами через границу жидкость — газ, т. е. принимает на границе жидкость — газ то же положение, что и самопроизвольно адсорбирующиеся молекулы. В этом положении молекулы коллектора понижают свободную энергию поверхности жидкость — газ, и для вывода их из этого положения необходима затрата работы, которая приближенно равна

$$\varphi = Lm\delta^2,$$

где δ — поперечник площади соприкосновения частицы с пузырьком.

Таким путем, располагая адсорбционными постоянными вещества, можно в первом приближении оценить величину той работы, которая необходима для отрыва частицы от пузырька. Чем больше эта работа, тем, понятно, больше устойчивость связи, тем прочнее комплекс частица — пузырек воздуха в данной обстановке процесса. Приближенность выражения прочности прикрепления $\varphi = Lm\delta^2$ главным образом зависит от того, что неровности на площади контакта не допускают возможности вхождения в границу жидкость — газ всех молекул адсорбционного слоя одновременно.

Аналогично учитывается наличие на границе жидкость — газ молекул пенообразователя или молекул коллектора (обладающего высокой капиллярной активностью), адсорбированных непосредственно из раствора к моменту столкновения пузырька с частицей. Причем прочность прикрепления минеральной частицы к пузырьку воздуха уменьшается на величину работы десорбции молекул этих капиллярно-активных веществ.

Отсюда получаем возможность выразить количественно флотационную активность таких коллекторов, как ксантаты, жирные кислоты и т. д.

Так, для коллекторов, обладающих высокой капиллярной активностью:

$$\Delta F = l\left(\frac{\gamma C}{\gamma C + 1} - \frac{bC}{bC + 1}\right),$$

где l, γ и b — адсорбционные и капиллярная постоянные коллектора;
C — концентрация коллектора

Задаваясь выражением величины стабилизирующей способности пенообразователя в отношении пузырьков газа как функции концентрации пенообразователя и его капиллярной активности, можно выразить связь между N и концентрацией пенообразователя:

$$N = K_1 \frac{b_1 C_1}{b_1 C_1 + 1},$$

где K_1 — учитывает объем воздуха и условия его диспергации;
b_1 — капиллярная постоянная вспенивателя;
C_1 — концентрация вспенивателя.

Это приводит к выражению скорости флотации через концентрации пенообразователя, коллектора и их капиллярные постоянные:

$$y = \frac{\partial \ln \frac{1}{1-\varepsilon}}{\partial t} = K \frac{b_1 C_1}{b_1 C_1 + 1}\left(\Delta F - l_1 \frac{b_1 C_1}{b_1 C_1 + 1}\right),$$

где K — постоянная аппарата, учитывающая и все остальные неизменные условия опыта;
l_1 — адсорбционная постоянная вспенивателя.

С помощью этого развернутого уравнения я провел анализ действия пенообразователей.

Приведу только один пример анализа показаний опытов флотации с помощью выведенного конечного уравнения [1, стр. 52, 55].

По опытам Кека и Джасберга, исследовавших флотацию гипса (—60 +200 меш) олеатом натрия, при варьирующих расходах пяти пенообразователей (терпинеол, гептиловый, ниониловый, амиловый спирты и крезиловая кислота) получились следующие трудно объяснимые результаты [13]. Первые два пенообразователя дали извлечение в виде кривых с явным максимумом в области концентрации около 0,2 *ммоль/л*; ниониловый спирт дал практически постоянные извлечения в диапазоне 0,01 0,4 *ммоль/л*; два последних — дали извлечения, непрерывно возрастающие до концентрации 0,5 *ммоль/л* и выше.

Авторы не могли объяснить этого результата.

Приложение уравнения скорости флотации позволило по капиллярным постоянным всех веществ рассчитать теоретические начальные скорости процесса для всех пяти пенообразователей при всех испытанных концентрациях.

Результаты расчета скоростей флотации для всех пяти пенообразователей показали строгий параллелизм между кривыми извлечений и расчетных скоростей флотации [1, стр. 54].

Мне кажется это достаточно сильным доводом в пользу изложенной гипотезы механизма прикрепления.

Можно пожалеть, что систематических опытов флотации в литературе мало. Если бы мы располагали большим опытным материалом, можно было бы еще более достоверно оценить правильность выводов. Вне опытов всякие попытки опровергать и даже доказывать правильность предлагаемого мною механизма мне кажутся почти бесплодными.

Описанный молекулярный механизм прикрепления является единственным механизмом, действующим во флотационном процессе в отсутствии большого избытка реагентов (особенно трудно растворимых) и продуктов побочных реакций. Такие случаи флотационного процесса имеют место при чистых рудах (не содержащих больших количеств растворимых солей тяжелых ионов) и применении малых расходов растворимых реагентов.

Когда на фабрике пользуются коллекторами (заменителями) в виде всякого рода масел, которые, введенные даже в относительно малом избытке, дают эмульсию, то механизм прикрепления усложняется, и одновременно с молекулярным механизмом, особенно в первые минуты, действует механизм масляной флотации. По мере вывода эмульсии в пену процесс постепенно переходит к молекулярному механизму. Понятно, если концентрация эмульсии велика, то до конца процесс протекает как масляная флотация необратимо и теряет гибкость.

Остановлюсь еще на примере анализа влияния крупности частиц монодисперсного материала с помощью уравнения скорости [1, стр. 90]. Этот вопрос, как известно, давно занимает теоретиков и технологов, однако определенного, даже грубо приближенного, разрешения не получил.

Изменение крупности материала влечет за собой резкое изменение числа частиц, сопровождающееся обратным быстрым изменением их кинетической энергии, а следовательно, и динамических воздействий при столкновениях отдельных частиц с образовавшимся комплексом пузырек — частица.

Прямое решение вопроса из уравнения скорости (в его общей форме) о поведении в процессе раздельной флотации зерен разной крупности невозможно. Необходимо привлечь показания опытов. К сожалению, мы не имеем достаточного числа систематических наблюдений флотации отдельных классов крупности разных минералов. Я располагал только систематическими исследованиями флотации двенадцати классов крупности сфалерита (—295 +4,6 μ).

Эти опыты показали, что с наибольшей скоростью флотируют частицы —104 +74 μ. Скорость падает как в сторону более крупных зерен (очень медленно), так и более мелких классов крупности, в то время как по принятой гипотезе ($\varphi \approx L_1 m \delta^2$) скорость флотации должна была очень быстро падать в одном направлении от крупного материала в мелкому, ибо в этом направлении при одинаковой рецептуре флотации одновременно быстро падают и m и δ^2. Опыт, однако, показал, что мелкие классы флотируются лучше, чем предсказывает уравнение скорости. Одна из причин этого отклонения выясняется немедленно, если обратимся к расчету площади границы воздух — жидкость, используемой материалом, отфлотированным за данный промежуток времени. Эта площадь получается вне всяких гипотез делением количества отфлотированного материала данного класса на его средний диаметр. Наиболее мелкий материал использует значительно большую площадь. Так, за 4 мин.:

Крупность, μ	63	44,5	31,5	22,2	15,7	11,1	7,8	5,5
ε, %	79	74	70	63	45	36	34	28
ε/δ	1,2	1,6	2,2	2,8	2,8	3,6	4,2	5,1

Чтобы учесть это использование мелкими зернами большей площади, я ввел в уравнение скорости поправку на большую эффективость столкновений мелких зерен с пузырьками. Отсюда я сделал вывод о независимости результата флотации от крупности. Действительно, если вычислить извлечения по уравнению, принимая различие в плотностях адсорбционного слоя на частицах разного размера (расход реагентов был постоян-

ным), то расчетные извлечения получаются отклоняющимися от опытных в среднем для 8 классов и 5 интервалов времени в пределах +2,8 —2,3% (абс.).

Полученное конечное уравнение флотации зерен разной крупности основано, таким образом, на результатах единственной полной серии опытов, а поэтому является, может быть, и очень грубым приближением. Для вывода более точного уравнения необходимо располагать подобными сериями опытов флотации на разных минералах при вариации рецептуры и механизма диспергации воздуха.

Первый внимательный критик моей работы Н. В. Матвеенко исправил величину φ на энергию тяжести частиц, упрекая меня в недоучете силы тяжести [5]. Я воздержался от этого учета, так как работа силы тяжести, разрушающей комплекс, крайне мала. Гораздо более значительны по величине динамические воздействия вихрей и ударов, которые расчету не поддаются. Их влияние могли обнаружить только опыты, проведенные в одинаковых условиях в машинах с разными движениями частиц и пузырьков воздуха при вариации плотности пульпы.

Н. В. Матвеенко видит противоречие между моим выводом и опытами в том, что крупные зерна, как всем известно, флотируют медленнее, чем мелкие (из полидисперсной пульпы? — *К. Б.*), и предлагает для исправления величины работы прикрепления учитывать работу силы тяжести по вектору смещения частицы, вызываемому деформацией пузырька.

Если принять, как предлагает Н. В. Матвеенко, что смещение это пропорционально массе частицы, работа прикрепления для грубых классов будет очень быстро падать, а скорость флотации тонких классов увеличиваться. Описанные выше опыты раздельной флотации зерен разных крупностей сфалерита этого не подтверждают. Я, конечно, далек от мысли считать показания указанных мной опытов исчерпывающими. Вопрос о влиянии крупности мной не решен в окончательном виде. Для его решения необходимы новые опыты флотации при максимальном числе вариаций условий. Иной путь построения достоверной теории мне кажется просто немыслимым.

Например, даже при киносъемке со скоростью 3000 кадров в секунду наблюдатели не отметили заметных смещений частицы во время ее прикосновения к пузырьку, поэтому учет деформации пузырька, исходя из гипотезы Н. В. Матвеенко, дает преувеличенную оценку работы силы тяжести.

По принятой мной гипотезе молекулярного (адсорбционного) механизма прикрепления, поверхность пузырька не разрывается на площади контакта, а только переходит от шаровой поверхности сегмента к плоскости, сохраняя ввиду своей большой толщины свойства жидкой фазы. Это изменение формы поверхности пузырька при частицах малых относительно пузырька сопровождается ничтожным изменением площади поверхности пузырька и незначительно понижает капиллярное давление (если диаметр пузырька больше 0,1 *мм*).

Работу силы тяжести частицы следовало бы рассчитывать вдоль вектора, равного стреле шарового сегмента, исчезающего при закреплении частицы. Для частиц малого размера, когда углы закрепления меньше 15°, величина этого вектора равна $\delta^2/8R$ *см*, где R — радиус пузырька. Отсюда работа силы тяжести

$$A = \frac{\delta^5 \rho_1 g}{8R},$$

где ρ_1 — плотность минерала в воде;

g — ускорение силы тяжести.

Задаваясь равенством

$$L_1 m \delta^2 = A = \frac{\delta^5 \rho_1 g}{8R},$$

получаем возможность вычислить предельный верхний размер частицы, флотируемой принятым механизмом:

$$\lim \delta = 0{,}2 \sqrt{\frac{l \frac{m}{\Gamma_\infty} R}{\rho_1}},$$

где $l = L\Gamma_\infty$ — адсорбционная постоянная коллектора, *эрг/см²*;

$\frac{m}{\Gamma_\infty}$ — относительная плотность адсорбционного слоя коллектора на минерале.

В частных случаях при $K = 0{,}1$ *см*, $\rho_1 = 6{,}5$ *г/см²* для флотации бутил- и метилксантатами ($l = 40{,}7$ и $l = 8{,}0$) и при вариации m/Γ_∞ получаем значения lim δ для

	$m/\Gamma\infty$	0,3	0,5	0,8
lim δ	бутилксантат	1,15 *мм*	1,36 *мм*	1,6 *мм*
	метилксантат	0,67 *мм*	0,79 *мм*	0,93 *мм*

т. е. предельные по размеру зерна значительно превосходят обычные флотационные крупности.

Если поперечник частицы взять в два раза меньше, чем предельный, прочность прикрепления упадет в 4 раза, а работа тяжести в 32 раза, т. е. даже для таких крупных частиц ($> 0{,}4$ *мм*) работа силы тяжести составляет только одну восьмую от работы прикрепления.

Следовательно, для частиц флотационной крупности нет нужды учитывать работу силы тяжести. Следовало бы, может быть, учесть влияние массы частицы при ее колебаниях, обязанных пульсации поверхности пузырька (1000 периодов в 1 сек.), констатированной уже упоминавшимися выше Спедден и Ганнам [11]. Такой расчет требует учета закономерностей высокочастотных колебаний.

Другой автор, обративший внимание на тот же слабый раздел книги, Л. И. Стремовский в своей работе «О механизме влияния тонких шламов на флотацию», напротив, считает мой вывод о независимости скорости флотации от крупности правильным, так как «...он находит подтверждение в практике флотации, которая расширила предельный размер совместно флотируемых частиц до 200 μ» [6]. Этот вывод Л. И. Стремовского совершенно не доказывает правильности моего вывода, так как поведение частиц разной крупности при одновременной их флотации (полидисперсная пульпа) подчиняется иным закономерностям.

Этот последний вопрос мною проанализирован. И здесь также пришлось столкнуться с недостаточностью систематических опытов флотации и опираться только на широко известные результаты старых работ, так как новые данные, хотя и многочисленны, но отрывочны и не поддаются анализу.

То же относится и к влиянию плотности пульпы [1, стр. 115—134]. Здесь систематические данные опытов флотации, несмотря на обилие работ, ограничиваются единицами. Удалось использовать только результаты опытов С. И. Митрофанова. В большинстве работ имеются лишь разрозненные, случайные, часто противоречивые наблюдения. На таких данных ни проверять, ни строить теорию процесса невозможно.

Итак, для построения теории флотации или проверки новых концепций совершенно необходимы систематические работы как в иссле-

вательских лабораториях, так и на фабриках. Пора нам отказаться от доказательств правильности своих высказываний на устаревших данных. Практика флотации и опыт флотаторов далеко ушли вперед. Поэтому необходимы новые, более систематичные, более прецизионные опыты для построения надежной, достоверной базы, для всяческих прочных умозаключений. Только таким путем мы избежим пут метафизических, умозрительных, построений теории флотационного процесса.

Как я неоднократно отмечаю в книге [1, стр. 31, 33, 39, 40, 42, 56, 59. 68 и др.], для всякой теории процесса, как воздух, необходимы более твердые, более точные данные об особенностях свободной энергии границ жидкость — газ, той энергии, которая используется в процессе.

Надлежит уточнить многие данные о капиллярных и адсорбционных константах (динамических и статических). Необходимо упорядочить табличные данные о поверхностном натяжении растворов, так как помещенные в справочниках далеки от совершенства. Нужна разработка новых методов измерения поверхностного натяжения. Особенно важно разработать доступные методы таких измерений на движущейся поверхности, как, например, пузырька в воде, и изучать свойства пены при вариации условий флотации.

Следует шире развернуть работы по измерению адсорбции реагентов на минералах при флотационных концентрациях.

Необходимо уточнять методику измерения малых краевых углов пузырька на поверхности минералов в ионной обстановке флотационной пульпы. Эти измерения могут дать много ценных сведений о физико-химии поверхности (как убедительно показал акад. П. А. Ребиндер), а также, при достаточной точности их, позволят независимым путем следить за глубиной депрессии или активации минерала.

Результаты перечисленных работ, взятые разрозненно, конечно, не могут служить для построения теории процесса, они могут только, как мы видели на примере работ по депрессии сфалерита цианидом, привести к более правильному, более экономичному расходу дорогих реагентов и с этой стороны могут быть весьма полезными и ценными после тщательной проверки их хорошо поставленными опытами флотации.

Моя книга «Закономерности флотационного процесса» излагает только метод анализа результатов опытов, она обладает недостатками, как я отметил в предисловии к ней.

Наиболее серьезными недочетами книги являются следующие:

1. Отмеченные выше недостаточно солидные экспериментальные обоснования выводов о влиянии плотности пульпы и крупности материала.

2. В уравнении кинетики величина N — число пузырьков газа — предполагает все пузырьки монодисперсными, что, конечно, является грубым упрощением. Эту ошибку исправили З. В. Волкова [4] и позднее К. Л. Зесерланд [12], заменившие N числом, полученным по функции распределения. Но такая замена сделала уравнение скорости весьма громоздким и трудно приложимым.

Для учета действия пенообразователя требуется более точная формула, чем формула Эдсера.

В книге не оговорено достаточно четко, что постоянная K, которая названа константой прибора (машины), включает в себя и все особенности течения процесса, например, все вариации динамических воздействий составляющих пульпы на образовавшийся комплекс частица — пузырек. Следовало бы каждый раз подчеркивать, что K остается постоянной не только самой машины, но и постоянных условий работы (руда, разжижение и т. п.).

Это упущение может приводить к недоразумениям при чтении книги, хотя и не меняет заметно выводов.

Как видите, моя книга — прекрасный объект для дискуссии. Связывая положения теории с практикой, она одинаково открыта для критики как философов, теоретиков, так и технологов. Заранее знаю, что теоретики будут обвинять ее за слишком упрощенный подход к теории, за забвение и недоучет последних данных науки, за дерзко неуважительное отношение к авторитетным высказываниям по вопросам теории флотации. Одновременно технологи будут обвинять ее за то, что в ней нет конечных решений конкретных вопросов технологии и за слишком сложное местами изложение, затрудняющее понимание высказанных положений.

Еще раз напоминаю, моя книга — только опыт построения теории флотационного процесса. При всех своих многочисленных недостатках она излагает метод подхода к вопросу и ориентирует исследования как отдельных звеньев, так и главного механизма процесса, чтобы с минимальной затратой времени мы могли погасить старый долг научных работников перед Родиной и подойти к нашей конечной цели — разработать действенную теорию пенного флотационного процесса, теорию жизненную, неразрывно связанную с практикой и способную расти, совершенствоваться, идти в ногу и опережать успехи и новые достижения наших фабрик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоглазов К. Ф. Закономерности флотационного процесса, Металлургиздат, 1947.
2. Белоглазов К. Ф. Кинетика флотационного процесса. Цветные металлы, 1939, № 9.
3. Богданов О. С., Филановский М. Ш. К вопросу о прикреплении минеральных частичек к пузырькам воздуха. ЖФХ, 1940, т. 14, № 2.
4. Волкова З. В. Процесс минерализации пузырьков воздуха во флотации. ДАН СССР, 1946, т. 51, вып. 6, стр. 445.
5. Матвеенко Н. В. О кинетике флотационного процесса. Металлургиздат, 1951.
6. Стремовский Л. И. О механизме влияния тонких шламов на флотацию. Сб. Обогащение руд горно-химического сырья. Госхимиздат, 1950.
7. Ребиндер П. А. Физико-химия флотационных процессов. ОНТИ, 1933.
8. Эйгелес М. А. Теоретические основы флотации несульфидных минералов. Металлургиздат, 1950.
9. Edser E. Koll.-Chem., 1922.
10. Zuniga H. G. Bol. minero Soc. nacl. mineria (Chile), 1935, № 47
11. Spedden R. H., Hannam W. S. Am. Inst. Min. Met. Eng., Mining Technol v. 12, № 2. Techn. Publ., 1948, № 2354.
12. Sutherland K. L. J. phys. coll. chem. 1948, № 52.
13. Keck W E. Jasberg P. Trans. A. I. M. E. 1938, № 129.