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

ОБЗОР ДИСКУССИИ ПО ДОКЛАДУ ПРОФЕССОРА К. Ф. БЕЛОГЛАЗОВА «ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФЛОТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА»[1]

В марте и апреле 1951 г. в Ленинградском горном институте проходил семинар-дискуссия по вопросам теории флотации. В семинаре приняло участие около 140 человек, представлявших 15 научных организаций. Было проведено шесть заседаний, на которых заслушано и обсуждено три доклада:

1) К. Ф. Белоглазова — «Исторический обзор развития теории флотационного процесса за рубежом»;

2) К. Ф. Белоглазова — «Основные закономерности флотационного процесса»;

3) С. И. Митрофанова — «Современное состояние теории флотационного процесса».

Наиболее оживленная дискуссия развернулась по второму докладу К. Ф. Белоглазова. В выступлениях была дана общая оценка книги К. Ф. Белоглазова «Закономерности флотационного процесса»[2], высказан ряд критических замечаний по отдельным разделам работы и намечены дальнейшие пути развития исследований по теории флотационного процесса.

Систематическое изложение дискуссии по этой работе дается в сокращенном виде. В конце обзора приводится заключительное слово профессора К. Ф. Белоглазова, в котором разъяснены вопросы, не разрешенные в ходе дискуссии.

Общие итоги дискуссии по докладам, заслушанным на семинаре, нашли отражение в резолюции совещания, почти полностью публикуемой в заключении обзора.

I. О СОДЕРЖАНИИ ТЕОРИИ ФЛОТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

Вопрос о содержании теории флотационного процесса вызвал законный интерес многих участников семинара-дискуссии, так как успешному созданию плодотворной теории в немалой степени способствует четкое определение ее задач.

Под теорией флотационного процесса К. Ф. Белоглазовым понимается такая последовательность положений, которая позволяет количественно с достаточной точностью предугадать течение флотационного процесса во времени при изменении его условий. Единственным критерием правильности такой теории служит количественное совпадение предсказаний теории с фактами практики.

С этим определением согласились профессора С. Е. Андреев и О. С. Богданов. Как отметил О. С. Богданов, теория, которая устанав-

[1] Составлен Г. А. Осолодковым.

[2] Закономерности флотационного процесса, Металлургиздат, 1947.

ливает основы флотационного процесса, позволяет предугадывать его закономерности и применять эти закономерности в практике, может быть названа теорией флотационного процесса.

В выступлении Г. А. Осолодкова четкое и совершенно бесспорное исходное положение К. Ф. Белоглазова было сопоставлено с высказываниями В. И. Классена, из которых следует, что любой отдельно взятый элемент процесса, в том числе и второстепенный, можно называть теорией флотации [1].

Объем и задачи теории флотационного процесса были определены также Д. С. Емельяновым и В. А. Рундквистом. Д. С. Емельянов указал, что единой и общепризнанной теорией флотации до настоящего времени нет. Гипотезы, предложенные для объяснения флотации, касаются только так называемого элементарного акта флотации и не охватывают процесса флотационного разделения минералов в целом. Теория любого технологического процесса в трактовке Д. С. Емельянова должна не только правильно объяснять каждое явление или звено, имеющее существенное значение в процессе, но она также должна позволять изменять течение технологии в желательном для нас направлении. Эта вторая сторона теории для любого технологического процесса является столь же существенной, как и объяснение самих явлений, наблюдаемых в технологии. То, что до настоящего времени именуется теорией флотации, правильнее называть *теорией элементарного акта флотации.*

По мнению В. А. Рундквиста, неверно приписывать наименование «теории флотации» теоретическим разработкам, касающимся только одного, притом не самого важного раздела общей теории флотации, — раздела, трактующего о так называемом элементарном акте флотационного процесса. В объем теории флотации должны входить все элементы процесса, определяющие конечный эффект флотации в общей взаимной увязке. Для успешного развития теории и практики флотации необходимо выделить главное. Основным вопросом теории и практики пенной флотации, по крайней мере на настоящем этапе ее развития, по мнению В. А. Рундквиста, является не элементарный акт флотации, а углубленное изучение поверхностных химических и адсорбционных (в широком смысле этого слова) реакций коллектора, активатора, депрессора на минеральных частицах и изучение химии пульпы. Решение современных проблем флотации, таких, как флотация оловянного камня, вольфрамита, рутила, многих редкоземельных минералов, флотация окисленных форм свинца, цинка, молибдена и других, упирается в разработку связи минеральная частица — коллектор и в исследование физико-химии пульпы. Раздел же о связи пузырек воздуха — коллектор, по мнению В А. Рундквиста, не может быть отнесен в настоящее время к важнейшим разделам теории флотационного процесса и потому, что он уже значительно разработан трудами К. Ф. Белоглазова, П. А. Ребиндера и др.

С определением понятия теории флотационного процесса, данным К. Ф. Белоглазовым, не согласился Т. С. Дубрава. По мнению Т. С. Дубравы, определение теории флотационного процесса, данное К. Ф. Белоглазовым, неполно, неточно и, следовательно, неправильно. В этом определении, как указывает Т. С. Дубрава, отсутствует качественная сторона процесса, не подчеркивается, что состояние науки определяется потребностью развития материального производства, техники. А это, по мнению Т. С. Дубравы, должно красной нитью проходить через любое научно-техническое исследование.

---

[1] Цветные металлы, 1947, № 5.

Под теорией флотационного процесса, считает он, нужно понимать совокупность знаний, основанных на критическом изучении и обобщении передовых достижений практики флотации полезных ископаемых, позволяющих сознательно управлять процессом, углубленно изучать условия, в которых он протекает, и действия всех факторов на минеральные частицы в технологическом процессе производства.

Однако возражения Т. С. Дубравы едва ли можно считать обоснованными. Совершенно очевидно, что нельзя создать теории процесса, не опираясь на практику, не живя ее интересами, не владея диалектическим методом. Если предсказания теории согласуются с практикой, как этого требует К. Ф. Белоглазов, то, очевидно, в этой теории правильно оценены и качественная и количественная стороны явлений. Если стать на точку зрения Т. С. Дубравы, то придется отвергать и определения содержания наук, данные классиками марксизма-ленинизма, например, определение Ф. Энгельсом химии как науки об атомах [1]. По Т. С. Дубраве, и это определение нужно будет признать неправильным: в нем не проходит «красной нитью» положение о том, что задачи науки определяются потребностью производства. Повидимому, Т. С. Дубрава не уловил разницы между вопросом о роли и месте науки в общественном производстве и вопросом о содержании и задачах науки.

II. ОБ ЭЛЕМЕНТАРНОМ АКТЕ ФЛОТАЦИИ

Большое внимание участников дискуссии привлек вопрос о механизме элементарного акта флотации, поставленный К. Ф. Белоглазовым.

Как известно, прочность прикрепления минеральной частицы к пузырьку воздуха К. Ф. Белоглазов характеризует величиной φ, причем

$$\varphi = L(m - m_1)q, \qquad (1)$$

где $L = RT\ln(0{,}69\ ab)$ — работа десорбции одного моля коллектора с поверхности раздела Ж — Г;

m и m_1 — величины сорбции коллектора на поверхности раздела Ж — Т и Ж — Г, *моль/см*^{2};

$q = \delta^2$ — площадь контакта пузырек — частица, *см*^{2};

a и b — постоянные уравнения Шишковского.

При выводе этого уравнения К. Ф. Белоглазов принимает совершенно одинаковыми процессы адсорбции в поверхности раздела жидкость — газ как свободных молекул из объема раствора, так и молекул, связанных с поверхностью минеральных зерен.

О. С. Богданов в своем выступлении указал, что, исходя из трактовки элементарного акта К. Ф. Белоглазова, видимо, можно получать результаты расчета флотационной активности реагентов, мало отличающиеся от результатов расчетов по другим методам, но все же справедливость этой трактовки остается еще недостаточно ясной.

По мнению О. С. Богданова, константы, характеризующие тот и другой процессы адсорбции, должны между собой различаться, хотя бы потому, что величины m и m_1, отвечающие одной концентрации коллектора в растворе, резко различны. О. С. Богданов считает, что процесс концентрации свободных молекул коллектора в поверхностном слое газ — жидкость не может быть тождествен процессу прилипания частиц к пузырьку.

---

[1] Ф. Энгельс. Диалектика природы. ОГИЗ, 1948, стр. 42, 46, 202, 206, 237.

Неверно и предположение, по мнению О. С. Богданова, о наличии обычной объемной водной фазы между прикрепленным пузырьком и минеральной частицей, обработанной коллектором. Согласно ряду представлений, развиваемых советскими учеными, эти тонкие диффузионные гидратные слои имеют другие свойства, чем объемная фаза жидкости.

Сопоставляя данные, характеризующие прочность прикрепления минеральных частиц, рассчитанных по уравнению К. Ф. Белоглазова, и уравнению (2), О. С. Богданов отметил попутно, что, согласно исследованиям А. Н. Фрумкина, Б. В. Дерягина и других, наличие пленки жидкости молекулярных размеров на поверхности твердого при закрепленном пузырьке вовсе не исключает образования трехфазного периметра и соответствующего краевого угла.

Если обозначить через ΔF убыль свободной энергии на единицу площади контакта при прикреплении минеральной частицы к пузырьку воздуха, то, как указывает О. С. Богданов, можно элементарным путем, не прибегая к силовой интерпретации процесса вытеснения жидкости воздухом с поверхности частицы, вывести уравнение, определяющее флотационную активность поверхности.

Под такой активностью подразумевается убыль свободной энергии на единицу поверхности газ — твердое при прилипании пузырька к твердому в равновесных условиях.

$$\Delta F = \sigma_{\text{г-ж}} \left(\frac{S_0 - S_0'}{S_2} - \cos\theta \right), \qquad (2)$$

где $\sigma_{\text{г-ж}}$ — свободная энергия единицы поверхности раздела жидкость — газ, *эрг/см²*;

S_0 — поверхность пузырька до закрепления;

S_0' — поверхность раздела жидкость — газ, оставшаяся после прикрепления пузырька;

S_2 — площадь поверхности газ — твердое (площадь контакта);

θ — краевой угол.

Это выражение, выведенное в окончательном, исправленном виде Б. В. Кизевальтером и Г. С. Стрельцыным, остается, очевидно, справедливым и в том случае, когда при прикреплении пузырька к поверхности твердого и образовании трехфазного периметра на площади контакта пузырька с твердым остается ориентированная жидкая пленка воды молекулярных размеров. В этом случае вместо $\sigma_{\text{г-ж}}$ будем иметь $\sigma_{\text{г-п}}$ — свободную поверхностную энергию, приходящуюся на единицу поверхности раздела газ — пленка.

Таким образом, для каждого θ можно подсчитать ΔF. Выражение (2) позволяет судить о флотационной активности поверхности твердого в статических условиях, измененной или не измененной поверхностно активными веществами.

Выражением (2) можно воспользоваться и для оценки флотационной активности реагента при изменении концентрации его в растворе. Сравнение таких расчетов на примере этил- и амилксантатов со значениями ΔF, рассчитанными по уравнению К. Ф. Белоглазова, приведено на рис. 1.

Флотационная активность коллектора, вычисленная по уравнению (1) К. Ф. Белоглазова как функция от концентрации коллектора в объеме раствора, дает кривые, характер которых мало отличается от кривых, подсчитанных при помощи уравнения (2).

Совпадение значений ΔF, рассчитанных по обеим формулам, привело О. С. Богданова к заключению, что уравнение (1) К. Ф. Белоглазова

справедливо, если его несколько видоизменить и придать ему другой физический смысл. Прочность прикрепления частицы к пузырьку, как следует из уравнения (1), пропорциональна плотности адсорбционного слоя коллектора на минерале. По мнению О. С. Богданова, в данном случае величина L или, вернее, Lq, — не постоянная Ленгмьюра, а коэффициент пропорциональности, имеющий, очевидно, определенное значение, раскрыть которое, вероятно, будет не трудно.

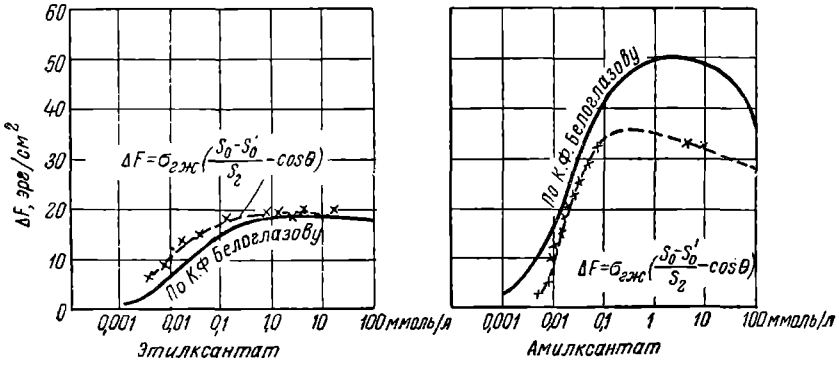


Рис.

Элементарному акту флотации значительную часть своего выступления посвятил и Г. С. Стрельцын. Он указал, что уравнение (1) К. Ф. Белоглазова, выражающее прочность закрепления минеральной частицы в поверхности раздела жидкость — газ через работу десорбции молекул коллектора, является крупным вкладом в теорию флотации. На основе этого уравнения можно проследить зависимость между количеством молекул коллектора, адсорбировавшихся на частице, и прочностью закрепления и в простейших случаях рассчитать работу отрыва частицы от поверхности раздела жидкость — газ. Вместе с тем, по мнению Г С. Стрельцына, механизм закрепления частицы твердого в поверхностном слое жидкость — газ, предложенный К. Ф. Белоглазовым, не является единственным механизмом, действующим при флотации. Уравнение К. Ф. Белоглазова, кроме того, не позволяет установить без использования теории краевых углов различий между прочностью закрепления частицы в плоской поверхности раздела жидкость — газ (мокрая пленочная флотация) и в криволинейной, на пузырьке воздуха (пенная флотация). Уравнение также не объясняет ограниченности распространения пузырька воздуха на поверхности твердого, имеющей неограниченные размеры.

Первое положение, по мнению Г С. Стрельцына, вытекает из того, что уравнение К. Ф. Белоглазова не объясняет естественной флотируемости некоторых минералов. Возможное объяснение ее внешними или внутренними (структурными) загрязнениями поверхности минерала какими-либо углеводородами Г С. Стрельцын отвергает. В доказательство он приводит два примера естественной флотируемости серы и талька, где эти загрязнения исключались.

Обосновывая остальные свои положения, Г С. Стрельцын ссылается прежде всего на якобы косвенные высказывания К. Ф. Белоглазова о том, что механизм пенной флотации принципиально отличен от механизма пленочной флотации [1]. Затем он указывает, что уравнение К. Ф. Белоглазова неполно, так как выведено из предположения, что поверхностная энергия

[1] Белоглазов К. Ф. говорил о сухой пленочной флотации (Ред.).

раздела жидкость — твердое при закреплении частицы на пузырьке воздуха не оказывает никакого влияния на величину φ. При выводе уравнения нужно было бы учитывать не только изменение запаса свободной энергии поверхности раздела жидкость — газ, но и двух остальных поверхностей раздела: жидкость — твердое и твердое — газ. Только в этом случае можно было бы избежать, по мнению Г. С. Стрельцына, ряда ошибочных положений.

Чтобы объяснить различие в прочности прикрепления при пленочной и пенной флотации, выяснить причины ограниченного распространения пузырьков воздуха на твердой поверхности больших размеров и пр., Г. С. Стрельцын считает обязательным использование теории смачивания и теоремы Ленгмьюра о работе десорбции.

По Г. С. Стрельцыну, уравнение

$$\Delta F = q\,\sigma_{ж\text{-}г}(1 - \cos\theta)$$

определяет прочность прикрепления минеральной частицы к плоской поверхности раздела Ж — Г. В случае закрепления минеральной частицы в криволинейной поверхности раздела жидкость — газ (пузырек воздуха) прочность закрепления определяется уже уравнением, выведенным Г. С. Стрельцыным в 1949 г. и независимо от него, несколько позже, Б. В. Кизевальтером.

$$\Delta F = \sigma_{ж\text{-}г}(\Delta S - q\cos\theta),$$

где ΔF — убыль свободной энергии системы;
ΔS — убыль поверхности пузырька воздуха;
q — площадь контакта.

Это уравнение, по мнению Г. С. Стрельцына, исправляет неточность, допущенную П. А. Ребиндером и рядом авторов при выводе уравнения убыли поверхностной энергии для случая пенной флотации. Простыми геометрическими преобразованиями легко доказать, что во всех случаях $\Delta S < q$. Неравенство это возрастает с уменьшением размера пузырька при неизменной q. Для данного размера частиц наибольшая разность между ΔS и q соответствует случаю, когда пузырек воздуха полностью вписывается в границы частицы с предельным краевым углом.

При использовании теоремы Ленгмьюра для расчета прочности прикрепления частицы к пузырьку воздуха, по мнению Г. С. Стрельцына, необходимо учитывать, что уменьшение поверхности пузырька при закреплении частицы не равно, а меньше площади контакта, и в этом случае прочность закрепления будет определяться не уравнением $\varphi = L(m - m_1)q$, а другим уравнением, учитывающим приведенное выше неравенство между ΔS и q. Сравнительно простыми рассуждениями можно доказать, что прочность закрепления частицы на пузырьке воздуха, исходя из теоремы Ленгмьюра, будет равна $\varphi = L(m - m_1)\Delta S$. Но так как ΔS находится в зависимости от равновесного краевого угла, то для определения прочности закрепления частицы на пузырьке воздуха необходимо знать не только плотность адсорбционного слоя молекул коллектора на частице и постоянную Ленгмьюра L, но также и равновесный краевой угол. Таким образом, по Г. С. Стрельцыну, уравнение прочности закрепления частиц в той форме, как оно выведено К. Ф. Белоглазовым [$\varphi = L(m - m_1)\,q$], верно только для случая закрепления частицы в плоском разделе жидкость — газ, т. е. мокрой пленочной флотации. При закреплении же частицы на пузырьке воздуха (замкнутой криволинейной поверхности), т. е. для пенной флотации, уравнение прочности закрепления, выведенное К. Ф. Белоглазовым неверно, так же как неверно и уравнение П. А. Ре-

биндера. Для применения его в пенной флотации необходимо ввести коэффициент, зависящий от равновесного краевого угла закрепления.

Г С. Стрельцын отметил также, что при выводе уравнения, связывающего краевой угол с плотностью адсорбционного слоя коллектора и его физико-химическими константами, К. Ф. Белоглазов снова не учел изменения запаса свободной энергии поверхности раздела жидкость—твердое. Все это, по мнению Г С. Стрельцына, привело К. Ф. Белоглазова к неправильному выводу о том, что уравнение прочности закрепления, выведенное на основе теоремы Ленгмьюра для случая закрепления частицы в плоской границе раздела жидкость — газ (мокрая пленочная флотация), пригодно без изменения для пенной флотации.

В конце выступления Г С. Стрельцын подчеркнул, что его замечания по уравнению прочности закрепления частицы в границе жидкость — газ не умаляют достоинств уравнения К. Ф. Белоглазова. Это уравнение позволяет правильно понять роль коллектора и вспенивателя в акте закрепления. Выводы закономерностей флотационного процесса, основанные на этом уравнении, следует, по мнению Г С. Стрельцына, всемерно развивать. Необходимо учитывать различие между пленочным и пенным процессами, т. е. не пренебрегать различием между ΔS и q. Это замечание относится как к трактовке К. Ф. Белоглазова, так и П. А. Ребиндера.

Оценка предложений Г. С. Стрельцына была дана С. И. Митрофановым, который указал, что, по Г С. Стрельцыну, все авторитеты в области флотации дают якобы неверное выражение для работы прилипания минеральной поверхности к пузырьку воздуха

$$A = \sigma_{ж\text{-}г}(1 - \cos\theta).$$

Однако это выражение определяет работу прилипания на единицу поверхности, когда один раздел фаз заменяют другим разделом фаз. Этим выражением, указывает С. И. Митрофанов, никогда не пользуются для определения прочности прикрепления пузырька. В этом отношении векторно силовая трактовка неправильна по существу, но выражение ее нагляднее и проще.

В поправке Г. С. Стрельцына С. И. Митрофанов не видит никакой новизны. В работах В. И. Классена произведено вычисление площади сектора, исчезающего при прилипании пузырька воздуха к поверхности минеральной частицы. По мнению С. И. Митрофанова, Г С. Стрельцын необоснованно упрекает К. Ф. Белоглазова в недостаточном учете изменения поверхности Ж — Г при прикреплении минеральных частиц к пузырьку воздуха, и считает, что теория К. Ф. Белоглазова в этом отношении безупречна, так как введение поправки Г С. Стрельцына не внесет каких-либо заметных изменений.

О молекулярном механизме прикрепления минеральных частиц к пузырькам воздуха интересную справку привел в своем выступлении В. А. Рундквист, зачитав высказывание П. А. Ребиндера об одной из работ З. И. Волковой [1]. «Эти исследования представляют несомненный интерес именно вследствие того, что для обычной флотации достаточны уже весьма небольшие краевые углы и малые по длине периметры смачивания; очень трудно решить вопрос о том, образуются ли во всех случаях периметры, т. е. происходит ли образование краевого угла с «проколом» пузырька или в некоторых случаях флотация может иметь место и при краевом угле, равном нулю, т. е. без образования трехфазного периметра путем своеобразной коагуляции».

[1] Ребиндер П. А. К физико-химии флотационных процессов. Сб. Новые исследования в области теории флотации. ОНТИ, 1937.

III. ОБ УРАВНЕНИИ СКОРОСТИ ФЛОТАЦИИ И ИНДЕКСЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ

На семинаре-дискуссии были затронуты следующие вопросы, связанные с уравнением кинетики флотационного процесса и индексом селективности К. Ф. Белоглазова: 1) о коэффициенте φ в уравнении скорости флотации; 2) о новой форме уравнения; 3) о сопоставлении индекса селективности К. Ф. Белоглазова с индексом селективности других авторов; 4) о применении уравнения кинетики флотации и индекса селективности при анализе опытных данных.

Уравнение, определяющее число частиц, отфлотированных за бесконечно малый промежуток времени, имеет, по К. Ф. Белоглазову, следующий вид:

$$dx = KN(n - x)\,dt,$$

где φ — коэффициент, характеризующий прочность комплекса частица — пузырек воздуха.

Как отметил Б. В. Кизевальтер, коэффициент φ в книге К. Ф. Белоглазова характеризовался также и как средняя длительность существования связи между частицей и пузырьком. Однако в докладе этому коэффициенту К. Ф. Белоглазов дал еще одно толкование. На различную размерность φ (отвлеченная величина или эрги), принимаемую К. Ф. Белоглазовым, указал также и О. С. Богданов.

Полагая, что различное толкование величин, входящих в математическое выражение, недопустимо, Б. В. Кизевальтер сделал попытку устранить это кажущееся противоречие. Не учитывая коэффициента пропорциональности K, входящего в правую часть равенства, он попытался доказать, что φ является безразмерной величиной.

Если в левой части выражения dx стоит безразмерная величина — число частиц, то и в правой части должна быть безразмерная величина. По определению К. Ф. Белоглазова, данному им в докладе, $KN(n - x)\,dt$ есть вероятное число столкновений, т. е. безразмерная величина [1]. Следовательно, указывает Б. В. Кизевальтер, и φ также должно быть безразмерным. Между тем из дальнейших рассуждений К. Ф. Белоглазова следует, что φ имеет размерность работы. Б. В. Кизевальтер считает, что К. Ф. Белоглазов при выражении φ через физико-химические постоянные забывает о том, как им была первоначально определена величина φ. Только потому, что коэффициент φ не был строго определен, при рассмотрении процесса закрепления частиц не были учтены силы отрыва. Если же φ определить как отношение числа прикрепившихся частиц к числу столкнувшихся, то, очевидно, этот коэффициент будет зависеть от соотношения сил отрыва и прилипания, т. е. от соотношения работ сил отрыва и прилипания. Поэтому, по мнению Б. В. Кизевальтера, φ можно определить, например, следующим образом:

$$\varphi = \frac{A_0 - A_1}{A_0},$$

где A_0 — работа сил прилипания, т. е. увеличение поверхностной энергии системы пузырек — частица при отрыве;

A_1 — работа сил отрыва, к которым относятся сила тяжести, центробежные силы, развивающиеся при скольжении частицы по пузырьку и, возможно, также и некоторые другие силы.

---

[1] В действительности К. Ф. Белоглазов определяет число столкновений за элемент времени произведением $N(n - x)\,dt$ («Закономерности флотационного процесса», стр. 8).

Из приведенной выше формулы видно, что с увеличением A_0 величина φ растет, т. е. с возрастанием плотности адсорбционного слоя коэффициент прилипания увеличивается и, следовательно, общая зависимость φ от плотности адсорбционного слоя сохраняется. Если $A_1 \leqslant A_0$, то $\varphi = 1$, т. е. все частицы, которые столкнутся с пузырьком, прикрепятся к нему.

Если $A_1 \geqslant A_0$, то $\varphi \leqslant 0$ и, следовательно, все частицы оторвутся от пузырька. Не настаивая на том, что зависимость φ от A_0 и A_1 имеет указанный вид, Б. В. Кизевальтер допускает, что она является значительно более сложной. Вместе с тем он считает, что К. Ф. Белоглазовым не была доказана пропорциональность коэффициента прилипания φ работе сил прилипания, поэтому нельзя писать, как это делает К. Ф. Белоглазов, что скорость флотации

$$y = K \frac{bc}{bc+1} l \left[\frac{\gamma c}{\gamma c + 1} - \frac{bc}{bc+1} \right]^*$$

Не доказана также, по мнению Б. В. Кизевальтера, по тем же причинам справедливость уравнения (10) ** и других аналогичных уравнений, связывающих скорость флотации с физико-химическими константами. Формулы эти, как ему кажется, нуждаются в дальнейшем уточнении.

На интегральной форме уравнения кинетики флотации и анализе индекса селективности А. Годена остановился в своем выступлении С. Е. Андреев. Форма уравнения кинетики флотационного процесса для простейших условий флотации ему кажется более доступной следующая:

$$1 - \varepsilon = e^{-Kt}$$

чем по К. Ф. Белоглазову

$$\ln \frac{1}{1-\varepsilon} = Kt.$$

Из самого выражения $1 - \varepsilon = e^{-Kt}$ видно, отмечает С. Е. Андреев, что и процесс флотации можно определить достаточно универсальным «законом сложных процентов», по которому протекает множество процессов органического и неорганического мира. По этому закону идут реакции растворения, изменение давления атмосферы с высотой; по этому закону растет дерево, размножаются бактерии и заживают раны, по этому закону изнашиваются шары в шаровой мельнице, просеивается руда на грохоте, идет измельчение в шаровой мельнице и т. д. Неудивительно, что этот закон проявился и в процессе флотации.

С. Е. Андреев указал, что К. Ф. Белоглазову надлежало бы обратить внимание на эту конкретную формулу с конкретным параметром, исследовать влияние режима процесса на величину этого параметра. Однако К. Ф. Белоглазов больше внимания уделил уравнению в общей интегральной форме

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

где за интегралом стоят две функции, связь которых со временем в явной форме пока еще не определена.

С. Е. Андреев предложил несколько усложнить конкретное уравнение введением еще одного параметра, придав уравнению вид

$$1 - \varepsilon = e^{-Kt^n}$$

---

* «Закономерности флотационного процесса», стр. 40, уравнение (9).
** Там же, стр. 7.

и исследовать влияние режима флотации на величину параметров K и n. Аналогичное уравнение предложил инженер В. В. Товаров для исследования кинетики измельчения клинкера, а В. А. Перов подтвердил справедливость этого уравнения на многих примерах измельчения руд.

Крупной заслугой К. Ф. Белоглазова, по мнению С. Е. Андреева, является предложенное определение понятия «индекс селективности»:

$$S = \frac{\ln \frac{\cdot}{1 \quad \varepsilon_1}}{\ln \frac{1}{1-\varepsilon_2}}$$

Этому выражению, считает С. Е. Андреев, можно придать другую форму

$$S = \frac{\frac{d\varepsilon_1/dt}{1-\varepsilon_1}}{\frac{d\varepsilon_2/dt}{1-\varepsilon_2}}$$

Выражение $\frac{d\varepsilon/dt}{1-\varepsilon}$ К. Ф. Белоглазов определяет как скорость флотации. По смыслу это формула удельной скорости извлечения. Механики определили бы ее как скорость, отнесенную к единице длины еще не пройденного пространства (до конечной точки).

В заключение С. Е. Андреев констатировал, что в толковании К. Ф. Белоглазова индекс селективности становится четко определенным и равняется отношению скорости флотации разделяемых минералов в момент t и что формула К. Ф. Белоглазова помогла, наконец, выяснить и значение индекса А. Годена

$$g = \sqrt{\frac{\varepsilon_1(1-\varepsilon_2)}{\varepsilon_2(1-\varepsilon_1)}}.$$

Этому индексу можно придать вид

$$g = \sqrt{\frac{\frac{\varepsilon_1}{1-\varepsilon_1}}{\frac{\varepsilon_2}{1-\varepsilon_2}}}.$$

После деления числителей и знаменателей на t

$$g = \sqrt{\frac{\frac{\varepsilon_1/t}{1-\varepsilon_1}}{\frac{\varepsilon_2/t}{1-\varepsilon_2}}}.$$

По аналогии с определением К. Ф. Белоглазова выражение

$$\frac{\varepsilon/t}{1-\varepsilon}$$

можно назвать средней скоростью флотации за время t. Следовательно, по А. Годену индекс селективности равен отношению средних скоростей флотации за время t.

Разница между обоими определениями понятна, и индекс К. Ф. Белоглазова определяет кинетику процесса, течение процесса во времени, в каждый данный момент t; индекс А. Годена определяет конечный результат работы за все время t.

Об использовании уравнения кинетики флотации при анализе опытных данных говорилось в выступлениях С. И. Митрофанова, Г С. Стрельцына, Г. В. Иллювиевой и Г. А. Осолодкова.

Как известно, анализ результатов опытов флотации с помощью логарифмической функции и индекса селективности S находит все большее применение. Однако в последнее время в литературе появились высказывания, критикующие этот метод анализа опытных данных. Так, Н. В. Матвеенко считает, что для анализа зависимости извлечения от времени, при извлечении ниже 90%, целесообразнее применять обычную функцию $\varepsilon = f(t)$, и только для случаев извлечения минерала выше 90% преимущество остается за формулой К. Ф. Белоглазова

$$\lg \frac{1}{1-\varepsilon} = f(t).$$

Широкое использование полулогарифмических координат вызвало возражения и С. И. Митрофанова. Против его замечания выступили Г. А. Осолодков, Г. С. Стрельцын и Г. В. Иллювиева.

По мнению Г А. Осолодкова, заключения отдельных авторов (С. И. Митрофанова, Н. В. Матвеенко) о том, что полулогарифмические кривые в общем случае не дают якобы ничего нового по сравнению с более простыми и понятными кривыми $\varepsilon - t$, основаны на недоразумении. Полулогарифмические кривые несравненно более содержательны, позволяют более отчетливо и объективно характеризовать особенности течения процесса и количественно их оценивать. Результаты опытов флотации, представленные в простых координатах $\varepsilon - t$, всегда выражаются затухающими кривыми, вне зависимости от условий опыта и характера обрабатываемого материала, так как величина отношения $\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t}$ во времени понижается. Такая особенность кривых $\varepsilon - t$ вуалирует влияние на характер кривых всех тех факторов, которыми интересуется флотатор.

Полулогарифмические кривые свободны от этого недостатка. На кривых $\lg \frac{1}{1-\varepsilon} - 1$ величина остатка извлекаемых минералов в пульпе совершенно не сказывается. Сложный побег этих кривых определяется только особенностями руды или принятых условий разделения. Совершенно очевидно, что расшифровка этих особенностей проще всего осуществляется при анализе полученных результатов с помощью функции $\lg \frac{1}{1-\varepsilon}$

То же, по мнению Г. А. Осолодкова, можно сказать и об индексе селективности К. Ф. Белоглазова. Этот индекс, определяющий относительную флотируемость разделяемых минералов, наиболее совершенный из всех предложенных. Рассчитываемый по результатам флотации, он служит очень тонким средством анализа показаний опыта. Для характеристики конечных высоких результатов разделения знание S может быть и излишне. В этом отношении, по мнению Г. А. Осолодкова, С. И. Митрофанов прав. Хорошие показатели опыта видны и без индекса селективности. Но при выборе оптимальных результатов разделения, при испытаниях различных реагентных рецептур, наконец, при наблюдениях за течением процесса во времени оценка относительной флотируемости облегчает решение задачи, позволяя количественно характеризовать изменения в условиях флотации. Таким образом, и функция $\lg \frac{1}{1-\varepsilon}$ и индекс селектив-

ности должны рассматриваться не как украшения отчета, а как действенные, очень удобные средства анализа опытных данных.

Сходные высказывания в защиту полулогарифмических кривых содержались и в выступлении Г. С. Стрельцына, также отметившего, что из анализа функции $\varepsilon = f(t)$ не определить, имеются ли ненормальности в процессе и в каком отрезке времени они проявляются. В то же время на основании формулы К. Ф. Белоглазова можно определенно установить начало изменения характера процесса. Если экспериментальные данные дают кривую, отличную от прямой, следовательно, произошло изменение в ходе процесса, а начало отклонения от прямой указывает на момент изменения. Анализ процесса на основе формулы

$$\lg\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right) = f(t)$$

позволяет объективно определить, насколько принятые меры к исправлению нежелательного отклонения оказались эффективными. Поэтому Г. С. Стрельцын указал на нецелесообразность изменения формулы

$$\lg\frac{1}{1-\varepsilon} = f(t)$$

введением каких-либо дополнительных коэффициентов в виде степенных показателей, как предлагал А. К. Лившиц, поскольку при этом невозможно будет установить, имеются ли изменения процесса во времени, указывающие на его ненормальность, и с какого времени эти изменения начались. Следовательно, в этом случае формула

$$\lg\frac{1}{1-\varepsilon} = f(t)$$

потеряет одно из своих преимуществ перед формулой $\varepsilon = f(t)$.

По мнению Г. В. Иллювиевой, индекс селективности, предложенный К. Ф. Белоглазовым,

$$S = \frac{\dfrac{1}{1-\varepsilon_1}}{\dfrac{1}{1-\varepsilon_2}},$$

бесспорно лучший из всех ранее существовавших. Однако он недостаточен для оценки результатов селективной флотации, так как высокое значение этого индекса может соответствовать очень низкому извлечению флотируемого минерала, т. е. высокое значение индекса селективности еще не свидетельствует о совершенстве процесса селективной флотации. Графическая же зависимость между величинами извлечения флотируемого минерала и индексом селективности К. Ф. Белоглазова может служить дополнительным критерием оценки совершенства процесса селективной флотации и быть полезной при выборе режима процесса.

На примерах анализа результатов промышленной флотации руд по методу К. Ф. Белоглазова остановился Г. А. Осолсдков. Им были рассмотрены вопросы: 1) общей оценки условий промышленной флотации руд; 2) оценки явления величины циркуляционной нагрузки (по металлу) в цикле основной флотации на конечные результаты разделения.

1. Во многих случаях течение основной флотации различных руд в производственных условиях характеризуется в координатах t, $\lg\frac{1}{1-\varepsilon}$

кривыми линиями. При порционной загрузке реагентов по фронту флотации характер кривых, как указал Г А. Осолодков, может быть вызван, в первую очередь, сложным составом обрабатываемого сырья, в котором извлекаемые минералы представлены компонентами различной флотационной активности. Если в первом приближении ограничиться классификацией извлекаемых минералов только на три категории (легко флотируемую, трудно флотируемую и нефлотируемую), то по результатам покамерного опробования циклов основной флотации удается сравнительно легко рассчитать константы скорости флотации каждой разновидности и распределение извлекаемого металла по этим разновидностям.

Такой расчет, проделанный Г А. Осолодковым для ряда примеров, характеризующих разнообразные руды (молибденовую, окисленную медную и сульфидную медную), дал интересные результаты [1]. Оказалось, что извлечения в окончательные концентраты, достигаемые на фабриках, очень близки к относительному содержанию металла в руде, представленного легко флотируемыми компонентами. Закономерность общая и охватывает самые различные случаи практики. Как показал дальнейший анализ полученных данных, недостаточная продолжительность перечистных операций, принятая на фабриках, приводит к очень низкому извлечению трудно флотируемых зерен в окончательный концентрат. Повышение извлечения при отсутствии средств активации трудно флотируемых компонентов возможно *лишь при увеличении продолжительности перечистных операций.* Как выяснилось при этих расчетах, параметры руды, рассчитанные по результатам промышленной флотации и укрупненных лабораторных опытов, получаются близкими. Это позволяет легко перейти от результатов лабораторного опыта к результатам промышленной флотации.

2. Использование кинетических представлений о процессе позволяет установить общие закономерности среди данных, внешне казалось бы самых противоречивых, и в вопросе о влиянии циркуляционной нагрузки (по металлу) в цикле основной флотации на конечные результаты разделения.

По данным, собранным на фабриках, циркуляционная нагрузка по металлу различным образом влияет на конечные результаты разделения руды.

Так, при медной сульфидной руде чем выше циркуляционная нагрузка Q, тем ниже извлечение меди в концентрате. При медной окисленной руде наиболее высокое извлечение меди в концентрат достигается при некоторой оптимальной циркуляционной нагрузке. Наконец, при молибденовой руде извлечение сохраняется на одинаковом уровне при самых широких изменениях в величине циркуляционной нагрузки Q.

Все эти как будто не согласующиеся между собой результаты легко объясняются, если учесть кинетику флотации отдельных разновидностей извлекаемых минералов.

Легко флотируемые компоненты одинаково успешно извлекаются при любой величине Q, благодаря большой длительности основной флотации. Влияние циркуляционной нагрузки на конечные результаты связано только с извлечением трудно флотируемых компонентов. При молибденовой руде принятая длительность перечисток концентрата настолько незначительна, что извлечение трудно флотируемых компонентов в этот продукт практически равно нулю. В этом случае сокращение времени перечисток против обычного приводит к увеличению Q только за счет легко флотируемых компонентов, с которыми основная флотация легко справляется.

---

[1] Записки Ленинградского горного института, 1950, т. XXIV, стр. 175.

В другом крайнем случае (медная сульфидная руда) сокращение длительности перечисток приводит уже к накоплению в оборотном продукте трудно флотируемых компонентов и в связи с этим — к возрастанию потерь металла в отвальных хвостах.

В заключение Г. А. Осолодков указал, что приведенные примеры не ограничивают всех возможных случаев приложения теории К. Ф. Белоглазова к объяснению тех или иных результатов флотации. Но и этих примеров достаточно для утверждения, что теория К. Ф. Белоглазова применима не только к теоретическим изысканиям, но и дает возможность подойти к анализу промышленных результатов флотации, найти общие закономерности среди этих результатов, а следовательно, и сознательно управлять технологическим процессом. Ни одна из предложенных ранее гипотез не обладает такими возможностями. В этом сила всех теоретических построений К. Ф. Белоглазова, и можно не сомневаться, что этот метод найдет себе широкое и плодотворное применение.

IV. О ВЛИЯНИИ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ФЛОТАЦИИ

Одним из выводов К. Ф. Белоглазова было положение о независимости скорости флотации от размера частиц [1]. Н. В. Матвеенко указал на то, что этот вывод неправилен, так как К. Ф. Белоглазов не учитывает действия силы тяжести частицы. По мнению Б. В. Кизевальтера, который детально остановился на этом вопросе, суждения обоих авторов имеют достоинства и недостатки. Н. В. Матвеенко прав в том, что предлагает учесть влияние силы тяжести, однако он забывает, что величина частицы влияет не только на ее прикрепление к пузырьку, но и на процесс столкновения частиц с пузырьками воздуха. К. Ф. Белоглазов не учитывает влияния сил отрыва, но пытается учесть влияние размера частиц на процесс их столкновения. Для этого он вводит множитель $\frac{1}{\delta^2}$, обосновывая это тем, что мелкие частицы используют большую площадь пузырьков. Такое обоснование Б. В. Кизельватеру кажется сомнительным, так как степень минерализации пузырьков воздуха (т. е. отношение площади, занятой частицами, к общей площади пузырьков) в современной флотационной машине достигает лишь 3—5% [2]. Поэтому как для малых, так и для больших минеральных частиц флотационной крупности вполне хватает площади пузырьков, и, по мнению Б. В. Кизевальтера, на основании различия в занимаемой частицами площади пузырьков вводить коэффициент $\frac{1}{\delta^2}$ нельзя. Как следует из книги К. Ф. Белоглазова, в полидисперсной пульпе частицы конкурируют друг с другом, так как «...для зерен выбранной крупности присутствие других частиц того же минерала будет сказываться так же, как сокращение площади поверхности Ж—Г» (стр. 101). Это утверждение при учете малой степени минерализации пузырьков пульпы Б. В. Кизевальтеру кажется сомнительным так же, как все вытекающие из него дальнейшие рассуждения. Конкуренция частиц, с точки зрения Б. В. Кизевальтера, имеет место, но не в толще пульпы, а в пене при коалесценции пузырьков. Поэтому, по Б. В. Кизевальтеру, влияние размера частиц

---

[1] «Закономерности флотационного процесса», стр. 117.

[2] По измерениям, произведенным О. С. Богдановым в 1939—1941 гг. на фабрике в условиях основной флотации при низком содержании полезного компонента в руде. Таким образом, полученные данные отвечают довольно большому числу практических случаев.

на результаты флотации правильнее было бы объяснять уменьшением числа встреч частиц с пузырьками воздуха при уменьшении их диаметра под влиянием отталкивающего действия на частицы обтекающих пузырьков струй жидкости.

Рассматриваемый вопрос, по мнению Б. В. Кизевальтера, нуждается в дальнейшей разработке.

V. О НАПРВЛЕНИИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ В ОБЛАСТИ ТЕОРИИ ФЛОТАЦИИ

Флотация, как указал в своем выступлении Д. С. Емельянов, вследствие многочисленных факторов, влияющих на ее результаты, динамичности и малодоступности для непосредственного наблюдения явлений, относится к числу наиболее трудных для теоретического исследования технических процессов. Несомненно, проще изолироваться от множества условий, влияющих на флотацию, и изучать отдельные явления, в той или иной мере связанные с процессом. Но такой метод мало эффективен для совершенствования промышленной флотации. Поэтому, по мнению Д. С. Емельянова, необходимо в теоретических исследованиях, по примеру К. Ф. Белоглазова, шире использовать флотационный опыт и разрабатывать теорию технологического процесса флотации. Только таким путем, как отмечает Д. С. Емельянов, можно ликвидировать разрыв между теорией и практикой и тем способствовать еще более успешному развитию социалистической горной промышленности.

Общую сводку результатов исследований по теории процесса флотации дал В. А. Рундквист. Он указал, что трудами советских ученых охвачен весь комплекс вопросов, входящих в объем науки о флотации, но не в такой мере, чтобы считать хотя бы удовлетворительным современное состояние теории флотации.

По мнению В. А. Рундквиста, комплекс элементов теории флотации сводится к четырем основным проблемам: 1) разработке способов исследования процессов взаимодействия растворимых и масляных коллекторов с различными многочисленными минеральными образованиями; 2) механизму и кинетике закрепления пузырьков воздуха на минеральных частицах, покрытых пленкой коллектора (также и при отсутствии коллектора); 3) химии пульпы — разработке необходимых химических и физико-химических условий для осуществления селективной связи коллектора с подлежащими флотации минеральными частицами (действие модификаторов, активаторов, депрессоров); 4) оценке изменений в конечной кинетике флотационного процесса, вносимых физикой флотационной ванны (вероятность встречи, динамика встречи пузырьков и частиц, разгрузка пузырьков при коалесценции и в пене и пр.).

Важнейшими и наиболее объемными и трудоемкими на современном этапе развития промышленности являются, по мнению В. А. Рундквиста, первая и третья проблемы, предусматривающие разработку способов флотации всех минералов вообще.

Не останавливаясь на анализе работ по этим проблемам, В. А. Рундквист указал как на отрицательное явление увлечение некоторых авторов «гипотезированием», т. е. созданием на малом экспериментальном материале своих «теорий флотации» на основе гипотетических, подчас надуманных предположений. Редакции журналов «Цветные металлы» и «Горный журнал», по словам В. А. Рундквиста, зачастую пропускают статьи, компрометирующие и автора и журналы. К таким статьям относятся работы Ф. И. Нагирняка в «Горном журнале» и В. А. Глембоц-

кого в академических изданиях и в «Цветных металлах». Пылкостью и «эрудированностью» фантазии, по мнению В. А. Рундквиста, отличаются и некоторые статьи В. И. Классена. Кроме пропаганды важности для флотации растворенного воздуха, в них можно встретить и объяснение гистерезиса смачивания и выяснение буферного действия электростатических сил в слое диполей воды, прилегающем к границе раздела фаз. Правда, в последнем вопросе В. И. Классен вступает в противоречие с автором гистерезиса смачивания П. А. Ребиндером [1].

По мнению Д. С. Емельянова, теория флотации должна развиваться не только как теория элементарного акта или других элементарных явлений, а главным образом как теория технологии. Между тем наблюдается упорная тенденция к разработке теории элементарных явлений в ущерб теории технологии флотации. Изучение элементарных явлений, связанных с флотацией, также необходимо, но занимаются им мало и, как указывает Д. С. Емельянов, довольно поверхностно. Эти вопросы, по его мнению, должны изучаться не технологами-флотаторами, в том числе и не технологами, которые ныне числят себя теоретиками флотации, а учеными физиками, химиками и физико-химикам. При этом технологи, в том числе и теоретики-технологи, должны четко разъяснять ученым физико-химикам, что и в какой мере интересует флотаторов. В частности, физико-химикам, физикам и химикам надо передать изучение вопросов: 1) природы молекулярных явлений, протекающих на поверхности минералов; 2) закономерности адсорбции реагентов на минералах при весьма малых концентрациях реагентов в растворе; 3) особенностей свободной энергии на границе жидкость — газ, в частности, изменений поверхностного натяжения пузырьков воздуха, движущихся в воде; 4) изучения свойств минерализованных пен и т. п.

О направлении дальнейших исследований по теории флотации высказался также С. И. Митрофанов. Он отметил как наиболее ценную ту часть выступления В. А. Рундквиста, где говорится о том, что из всего комплекса явлений сложного процесса флотации нужно выбрать основное звено, исследование которого даст возможность решить вопрос успешного приложения теории к практике. Таким звеном, как подтверждает С. И. Митрофанов, является химическая сторона процесса или химия пульпы. В тех процессах, где флотаторы научились регулировать концентрацию реагента, определяющего результаты флотации, по мнению С. И. Митрофанова, успех обеспечен. Там, где этого не умеют делать, работают вслепую. Поэтому разработка метода контроля концентрации реагентов в пульпе (может быть и автоматического) даст верное средство для управления процессом флотации. Чтобы иметь ясное представление о теории флотационного процесса, необходимо, считает С. И. Митрофанов, разрабатывать особенно химический участок. Это позволит получить для практики средства управления процессом флотации. Подчеркивая важность таких исследований, он говорит о необходимости продолжения работ и по краевым углам, но только отведя им определенную область приложения.

О. С. Богданов согласился с основными выводами доклада С. И. Митрофанова, особенно по вопросам планирования теоретических работ, и отметил несколько главных методов и направлений в разработке основ флотации:

1) исследование механизма прилипания пузырьков к твердой поверхности (Институт физико-химии АН СССР, Ленинградский горный институт);

[1] Известия АН СССР, 1936, № 5.

2) исследование действия реагентов при помощи радиоактивных изотопов (Механобр, Институт горного дела АН СССР, ГИНЦВЕТМЕТ);

3) исследование физических основ флотации при помощи «лупы времени» (Механобр и фабрики);

4) исследование кинетики флотации (Ленинградский горный институт и фабрики).

О. С. Богданов предложил переиздать книгу Б. Ф. Белоглазова с учетом накопившихся новых представлений и критики отдельных положений.

VI. ОБЩАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ ПРОФЕССОРА К. Ф. БЕЛОГЛАЗОВА «ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФЛОТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА»

Общая оценка работы профессора К. Ф. Белоглазова была дана в выступлениях С. И. Митрофанова, Д. С. Емельянова, О. С. Богданова, Г. В. Иллювиевой, Г А. Осолодкова и Т. С. Дубравы.

С. И. Митрофанов отметил, что попытка объединения действия нескольких реагентов в такой диалектической форме, в какой она дана в книге, делается впервые. Начатое К. Ф. Белоглазовым, несомненно, должно быть продолжено. Для этого необходима, по мнению С. И. Митрофанова, постановка работ, выполняемых по определенной программе. Экспериментальные работы должны в первую очередь дать материал для дальнейшей разработки этой теории, дальнейшего вывода закономерностей, охватывающих не только действие коллектора, пенообразователя или отношение жидкого к твердому, но и закономерностей, учитывающих и другие условия флотационного процесса, особенно взаимосвязь действия коллектора и депрессора.

Основная ценность работы К. Ф. Белоглазова, как указывал О. С. Богданов, заключается в том, что в ней впервые сделана попытка связать разрозненные элементы процесса в одно целое. В этом плодотворность, новизна и прогрессивность работы, несмотря на то, что некоторые отправные положения К. Ф. Белоглазова, например представления об основном акте флотации — образовании комплексов частица — пузырек, весьма спорны и, возможно, неверны.

О. С. Богданов отмечает также новый методический подход К. Ф. Белоглазова к изучению процесса флотации. К. Ф. Белоглазов предлагает изучать закономерности флотации по кинетике процесса, что является, безусловно, ценным направлением в изучении основ флотационного процесса. Простые флотационные опыты с минералами, фиксирующие только суммарное извлечение, отнесенное к исходному содержанию минерала, без учета времени флотации, не смогут вскрыть закономерности флотационного процесса в той мере, в какой могут это осуществить специальные опыты, поставленные по методу, предлагаемому К. Ф. Белоглазовым. Разумеется, как указывает О. С. Богданов, это не означает, что теперь любые флотационные опыты, даже в рамках простых испытаний, надо проводить исключительно по методу и с обработкой результатов согласно этому направлению. Но несомнено, например, что такие вопросы, как влияние крупности частиц, концентрации твердого, количества и диспергации воздуха могут быть гораздо лучше оценены по кинетике флотации, чем по конечному ее результату. Направление исследований, выдвинутое К. Ф. Белоглазовым, бесспорно, ни в какой мере не исключает других рациональных направлений в изучении основ флотации, в том числе и самостоятельного изучения отдельных элемен-

тов, составляющих процесс. Наоборот, из этого направления вытекает необходимость такого рода исследований.

Общее представление К. Ф. Белоглазова о механизме кинетики прикрепления частиц к пузырькам воздуха, по замечанию Д. С. Емельянова, находится в полном соответствии с наблюдаемыми фактами и является весьма плодотворным. К. Ф. Белоглазов своими трудами по теории флотации первый привлек внимание специалистов к изучению кинетики процесса. Представления К. Ф. Белоглазова о мгновенности и обратимости процесса прикрепления, о влиянии турбулентности движения частиц и пузырьков в пульпе позволяют правильно подойти к анализу результатов флотации в зависимости от времени и, в частности, позволяют правильно подойти к разработке теории флотационных машин. Из молекулярного механизма прикрепления флотируемых частиц к пузырькам воздуха вытекает как следствие повышение эффективности флотации при малых расходах реагентов-собирателей. Это обстоятельство не только снижает стоимости флотации, но и увеличивает селективность обогащения. Выведенное К. Ф. Белоглазовым уравнение скорости флотации связывает результат обогащения с основными условиями, влияющими на течение процесса.

По мнению Д. С. Емельянова, возражение некоторых авторов (например, М. А. Эйгелеса и др.) о том, что, по К. Ф. Белоглазову, результат флотации якобы однозначно зависит только от плотности адсорбционного слоя коллектора на поверхности минерала (т. е. от величины m), несостоятельно. Уравнение скорости флотации показывает, что результаты флотации, как и само значение m, зависят от множества параметров. Из примеров, приведенных К. Ф. Белоглазовым, следует, что, пользуясь выведенным статистическим уравнением скорости флотации и результатами правильно поставленных опытов, можно вскрывать и анализировать наиболее трудно поддающиеся изучению явления, имеющие первостепенное значение для флотации (например, флотационную активность реагентов, плотность пульпы, крупность флотируемых частиц и т. п.).

По мнению Г. В. Иллювиевой, Т. С. Дубравы и Г А. Осолодкова, оригинальная по своему содержанию и направлению работа К. Ф. Белоглазова «Закономерности флотационного процесса» — крупнейший методический и теоретический вклад в дело развития флотации. Это первая попытка анализа главного механизма пенной флотации и отдельных звеньев процесса на основе молекулярного представления о природе связи частицы с пузырьком и статистических представлений о кинетике образования и разрушения флотационных комплексов.

К. Ф. Белоглазов анализировал и обобщил огромный, чрезвычайно разрозненный материал различных флотационных опытов и на основании этого анализа предложил общее уравнение кинетики флотационного процесса, позволяющее правильно объяснять ряд экспериментальных данных и даже предсказывать результаты некоторых экспериментов.

К наиболее важным итогам работы К. Ф. Белоглазова относятся:

1) методический подход к разрешению проблемы;

2) установление математической зависимости между извлечением и основными факторами, определяющими процесс флотации (прочность связи между частицей и пузырьком, адсорбционные постоянные коллектора и вспенивателя, плотность монослоя, число пузырьков воздуха и т. д.);

3) разрешение, с помощью выведенного уравнения, важных вопросов практики флотации: а) теоретическое доказательство необходимости

минимальных расходов реагентов; б) оценка влияния плотности пульпы и гранулометрического состава обрабатываемого материала на результаты флотации и т. д.;

4) новые методы анализа результатов флотации с помощью функции $\lg \frac{1}{1-\varepsilon}$ и индекса селективности S.

VII. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЕ СЛОВО К. Ф. БЕЛОГЛАЗОВА

Оппоненты в обширных критических обзорах моей книги высказали столь большое число положений, особенно против моей трактовки главного звена флотации, что я вынужден ограничиться только возражениями против основных высказываний С. И. Митрофанова, О. С. Богданова и Г. С. Стрельцына.

Раньше, чем перейти к возражениям, я еще раз коснусь основных положений, исходя из которых я пришел к своей гипотезе при попытке построения связной теории процесса.

Выбирая гипотезу механизма прикрепления, пригодную для увязки отдельных звеньев процесса, я вынужден был обратиться к простейшему механизму, допускающему наиболее удобный путь количественных расчетов и одновременно удовлетворяющему требованиям пенного процесса. Из тех же соображений я остановился только на механизме прикрепления к пузырьку частиц флотационного размера, т. е малых сравнительно с диаметром пузырька. Согласно формулам А. Н. Фрумкина и Б. Кабанова, такие частицы образуют углы прикрепления, не превышающие 10°.

Принятая мною гипотеза совершенно исключает необходимость образования трехфазного контакта, что значительно упрощает все расчеты. Собственно, в этом отрицании трехфазного контакта и заключается вся дерзость моей книги, разрывающей путы, наложенные на теорию флотации древней теорией краевых углов. Выступления С. И. Митрофанова и О. С. Богданова верно критикуют принятое мною существование жидкого прослоя между частицей и пузырьком. Однако эта критика остается нечеткой, наполненной гипотезами, а не прямыми доказательствами. Это и понятно, так как все замечательные достижения А. Н. Фрумкина и Б. В. Дерягина, показавшие понижение толщины прослоя до молекулярных размеров, остаются бесспорными и строго доказанными только для равновесных, длительно существующих пузырьков с большим краевым углом.

Для контакта же большого пузырька и частицы флотационных размеров вопрос о толщине прослоя остается открытым. Трудно представить мгновенное образование прослоя молекулярной толщины поперечником 50 μ (средний размер флотируемых зерен) на пузырьке диаметром 1—2 *мм*, когда угол прикрепления, по А. Н. Фрумкину, Б. Кабанову и О. С. Богданову, меньше 2°. Пока еще мы находимся в атмосфере догадок, предположений, из которых ничего нельзя получить пригодного для количественных расчетов. Остается до сих пор окутанной туманом только качественных гипотез даже сама граница жидкость — газ, о строении которой высказано столь много противоречивых предположений. Достаточно напомнить хотя бы до сих пор не решенный вопрос об ее плотности сравнительно с плотностью жидкой фазы.

Что же касается толщины прослоя, необходимого для прикрепления молекулами коллектора, то не следует забывать о том, что работающими в механизме в каждый данный момент могут быть и не все

молекулы адсорбционного слоя, а только те из них, которые расположены на выступах поверхности. Но и в этом случае прочность прикрепления будет оставаться пропорциональной плотности адсорбционного слоя и площади контакта.

О. С. Богданов задает мне вопрос о величине константы десорбции при адсорбции свободных молекул и молекул, закрепленных на поверхности минерала.

Отвечаю. Так как явление адсорбции, как это принимается А. А. Жуховицким, Е. А. Гуггенгеймом и другими, определяется только поверхностным слоем жидкости практически молекулярной толщины, то, пока этот слой сохраняет свойства, присущие ему на жидкой фазе, константа Ленгмьюра должна оставаться всегда одинаковой.

Колоссальные концентрации, необходимые для образования в границе Ж — Г местного скопления молекул коллектора из раствора, только указывают на измеримое падение свободной энергии при вхождении в эту границу адсорбционного слоя коллектора. Дело обстоит совершенно так же, как и при нанесении капли нерастворимого поверхностно-активного вещества на чистую поверхность воды (например, в опытах Ленгмьюра), с той только разницей, что молекулы коллектора, закрепленные на твердой поверхности, не могут так быстро рассеиваться по поверхности Ж — Г. Конечно, если в качестве коллектора взять вещество с очень высокой поверхностной активностью, то при закреплении частицы возможен отрыв молекул коллектора от частицы и рассеивание их по поверхности пузырька, т. е. разрушение прикрепления.

Влияние твердой поверхности частицы на свойства прослоя воды можно предполагать, но количественно учесть не представляется возможным.

О. С. Богданов предлагает мне отбросить принятый мною механизм только потому, что на аналогичный механизм указывал чешский студент Барч для объяснения стабилизации пе́ны. Я пришел к моей гипотезе, совершенно не зная гипотезы Барча, с которой мне удалось познакомиться только в 1940 г., когда у меня были уже выведены флотационные активности коллектора, уравнение краевого угла, т. е. были готовы основные разделы книги.

Я допустил, быть может, грубую ошибку, не акцентировав свою роль в этом деле и перекинув в своей книге фактически никогда не существовавший мост к работе Барча.

Если мне будет предоставлена возможность переиздать книгу, я в первую очередь исправлю эту мою несомненную ошибку.

Если, как предлагает О. С. Богданов, отказаться в выражении прочности прикрепления от величины работы десорбции L и заменить ее коэффициентом пропорциональности, то нарушится очень важная связь между свойствами коллектора и прочностью прикрепления. Никаких количественных выводов, как мне кажется, нельзя будет делать.

О. С. Богданов особо отмечает, что при расчете флотационной активности я вынужден пользоваться статической, а не динамической поверхностной активностью коллектора, а потому вычисленные мною активности не отвечают динамичности процесса. Я должен еще раз сказать, что, так как поверхностная активность коллектора входит в выражение флотоактивности в качестве вычитаемого, то введение в выражение более низких динамических поверхностных активностей должно давать флотоактивности выше вычисленных мною. Особенно это верно для высших жирных кислот, но введение динамических констант скажется мало при ксантатах до гексилксантата.

О. С. Богданов и Б. В. Кизевальтер указывают на кажущееся противоречие в размерностях φ. В начальном общем уравнении кинетики φ в моей формуле — безразмерная величина, определяющая долю эффективных столкновений. Она и остается таковой до выяснения механизма прикрепления, когда вскрывается ее физический смысл, как энергии. Противоречия в этом нет. Например, совершенно аналогично, адсорбционная постоянная в уравнении изотермы адсорбции — отвлеченная величина, имеющая по своему физическому смыслу, вскрываемому анализом, размерность времени пребывания молекулы в адсорбционном слое.

О. С. Богданов раздражается, читая у меня в книге, что теория смачивания является «векторно-силовой концепцией». Таковой она и была в то время, когда я писал книгу, таковой она и осталась во многих учебниках. Она приняла энергетическую окраску только за последние четыре года.

Приведенные О. С. Богдановым диаграммы флотационных активностей этил- и амилксантатов, где сопоставлены величины, вычисленные мною и рассчитанные по новой формуле Г. С. Стрельцына и Б. В. Кизевальтера через равновесные краевые углы, порадовали меня весьма четким параллелизмом величин. Было бы весьма желательно провести подобные расчеты и для других коллекторов. Чем больше будет таких сопоставлений результатов независимых методов расчета, тем увереннее мы будем пользоваться ими на практике. Мне кажется только слишком низкой вычисленная флотоактивность для парафина (краевой угол $\theta = 105°$; $\Delta F = 46{,}17$ *эрг*).

С. И. Митрофанов, помимо упреков, на которые я уже ответил, указывает на более простое объяснение механизма прикрепления частицы к пузырьку воздуха (по Г. О. Ерчиковскому и др.). Этот механизм показался мне не заслуживающим доверия. Действительно, механизм этот требует участия в акте прикрепления, кроме коллектора и молекул, пенообразователя. Связь между обоими адсорбционными слоями предполагается как сцепление между полярными концами молекул пенообразователя и аполярными концами молекул коллектора. Вычислять прочность этой связи невозможно, и, кроме того, этот механизм требует для реализации высокой плотности слоя пенообразователя, т. е. высоких расходов пенообразователя, что противоречит всей практике флотации. Поэтому этот механизм и не анализировался мной. Если механизм прикрепления частицы к пузырьку по Г. О. Ерчиковскому кажется понятным, то еще более понятен мой.

Г. С. Стрельцын после похвалы моему выражению прочности прикрепления подверг мою гипотезу, на которой базируется выражение прочности, жестокому обстрелу с позиций чистой геометрии. В результате, считая мою гипотезу не пригодной для пенной флотации, оппонент полагает возможным и необходимым выбросить мою величину прикрепления в мусорный ящик, где покоятся теории мокрой пленочной флотации. Одновременно с моим детищем туда же попадает и формула академика П. А. Ребиндера. Хотя в такой компании может быть лестно находиться и в более скверном положении, но, не зная, что предпримет П. А. Ребиндер, я сам попытаюсь вернуть свою гипотезу на место.

Нападая на мою гипотезу, Г. С. Стрельцын забывает, что моя формула охватывает только случаи прикрепления частиц очень малых размеров сравнительно с пузырьками, когда углы прикрепления не выше 10°. В этом случае, наиболее распространенном в пенной флотации, та поправка на изменение площади поверхности пузырька, которую выводит Г. С. Стрельцын, не превышает одного процента от вычисленной мной

прочности прикрепления. Поэтому в первом приближении нет нужды ее учитывать.

Если бы я анализировал все многообразие соотношений между размерами частиц и пузырька, я был бы вынужден значительно усложнить формулу для φ. Но я сознательно упростил задачу, выбрав те соотношения размеров частиц и пузырьков, которые считаются обычными в практике флотации, поэтому вся геометрия, выдвинутая Г. С. Стрельцыным против меня, несостоятельна.

Еще более жесткую критику Г С. Стрельцын обрушил на мое уравнение краевого угла. Для опровержения уравнения необходимо разрушить его фундамент, т. е. доказать, что под пузырьком на твердой поверхности отсутствует прослой жидкой фазы, предполагаемый мною. Если этот жидкий прослой существует, то при энергетическом расчете краевого угла (так как контакт будет двухфазным) можно ограничиваться учетом изменения энергии только поверхности газ — жидкость, так как твердая поверхность, все время пребывая в жидкости, энергии своей при закреплении пузырька не меняет. Следовательно, упрек, брошенный мне Г. С. Стрельцыным, отпадает сам собой. Уравнение остается верным, пока прослой сохраняет свойства жидкой фазы. В это место и следовало бить, чтобы уничтожить уравнение. Повидимому, Г С. Стрельцын забыл правило, что раньше, чем вести «артобстрел», надлежит тщательно разведать позиции противника.

Что касается вопроса о различии прикрепления частицы к плоской и сферической поверхностям границы Ж — Г, то теперь, после выступления Г С. Стрельцына, могу ответить, что для моей гипотезы прикрепления в указанных условиях различия нет.

Остается немного добавить относительно выступления Б. В. Кизевальтера о влиянии размера частиц на результаты флотации.

В своем докладе я, собственно, ответил на возражения Б. В. Кизевальтера и показал, как можно учесть действие силы тяжести. Если принять, что действие силы тяжести может проявляться только по вектору, отвечающему стреле исчезающей сферической поверхности, то, как просто можно показать, эта стрела сегмента для частиц до флотационных размеров составляет квадрат поперечника частицы, деленный на восемь радиусов пузырька. Если принять это, то работа силы тяжести окажется пропорциональной поперечнику частицы в пятой степени. А так как прочность прикрепления у нас пропорциональна второй степени поперечника частицы, то понятно, что влияние работы силы тяжести будет заметно сказываться только у частиц, лежащих за пределами флотационных размеров, таких как 600—700—1000 μ. При сокращении размера частиц вдвое прочность прикрепления упадет в четыре раза, а работа силы тяжести в 32 раза. Поэтому для частиц флотационного размера работа силы тяжести составляет ничтожную долю и нет смысла ее вводить и учитывать.

Еще немного о критике введенного мною множителя $\frac{1}{\delta^2}$, чтобы учесть различие в площади поверхности жидкость — газ, используемой частицами разных размеров. Этот раздел я считаю одним из самых слабых у себя потому, что для оправдания моих расчетных предположений я не располагал хорошим материалом флотационных опытов. Единственная хорошо поставленная работа — флотация сфалерита двенадцати классов крупности, от 250 до 4,5 μ. На этой работе множитель $\frac{1}{\delta^2}$ себя оправдал. Все расчеты, сделанные по моему уравнению, дали отклоне-

ние от наблюдавшихся величин фактических опытов 2,5—2,8% в ту или другую сторону. Я считал, что как будто бы все благополучно, но в книге прибавил, что на этом останавливаться нельзя, нужны новые опыты по изучению влияния крупности частиц на результаты флотации, чтобы получить более правильные выводы.

Заканчивая свое выступление, я еще раз хочу подчеркнуть, что моя работа дает только метод построения теории. Если будет найден более правильный, более обоснованный путь расчета прочности прикрепления минеральной частицы к пузырьку воздуха через физико-химические параметры, чем принятый мною, то работу придется переделать, но в этом же принципиальном плане. Возросший за последние годы в СССР интерес к теории флотации, несомненно, гарантирует быстрое достижение успеха в делах построения действенной и практически ценной теории флотационного процесса. Время затишья прошло, впереди ярко горит цель наших устремлений.

Дискуссия дала мне очень много. Она усилила уверенность в правильности избранного мною пути и показала слабые стороны моей книги. Книга нуждается в существенной переделке, так как во многих местах необходимо ввести большую детализацию текста, чтобы устранить неясности, вызванные сжатостью и сухостью изложения. Отдельные места нуждаются в полной переработке.

За критику моей работы я от всего сердца благодарен всем участникам нашего семинара.

Заключение [1]

1. В области практики флотационного обогащения в промышленности СССР имеются значительные достижения. Однако, несмотря на значительные успехи в развитии методов флотационного обогащения, положение с разработкой общей теории флотации отстает от запросов современной промышленности.

2. Теория флотационного процесса должна количественно объяснить механизм взаимодействия отдельных факторов флотации в их совокупности, обеспечить возможность предопределения хода процесса во времени и дать средства управления процессом.

Работами советских ученых Б. В. Дерягина и А. Н. Фрумкина заложены научные основы теории элементарного акта флотации, но эти работы не закончены и не охватывают количественно и качественно всего комплекса явлений элементарного акта.

Ряд других очень ценных исследований по теории флотации ограничивается лишь изучением отдельных явлений. Хотя эти исследования расширяют представления о процессе флотации и являются полезными и необходимыми, они не объединены общим теоретическим направлением.

В ряде академических работ изучение теории процесса флотации ограничено изучением явлений смачивания твердого тела в условиях сорбции тех или иных веществ на его поверхности. Проведенная большая экспериментальная работа по изучению смачиваемости не привязана к кинетическим условиям флотационного процесса. Робкие попытки количественной формулировки связи явлений смачиваемости с флотационным эффектом не удовлетворительны.

---

[1] Из решения семинара-дискуссии, принятого 21 апреля 1951 г.

Это предопределило невозможность использования предложенных методов моделирования и применения результатов их в промышленной практике.

Следует признать несостоятельными методы решения теоретических вопросов флотационного процесса на основе ограниченных экспериментов во флотационной машинке или немногих измерений краевых углов и последующего развитого гипотезирования в объяснение всех явлений флотационного процесса.

3. Накопившийся огромный экспериментальный материал и большое число работ по изучению деталей процесса требуют создания единой теории флотации на основе широкого обобщения накопившегося материала и выявления закономерностей флотационного процесса во всем его разнообразии. Первым опытом создания такой теории является работа профессора К. Ф. Белоглазова «Закономерности флотационного процесса»; она еще не охватывает всего многообразия флотационного процесса и не представляет законченной теории, которой можно пользоваться для управления процессом и предопределять заранее его течение во времени. Вместе с тем, несомненно, что работа К. Ф. Белоглазова является оригинальной по методу решения вопросов кинетики флотационного процесса и содержит ряд ценных элементов, развитие которых может способствовать разработке единой теории флотации.

4. В результате проведенной дискуссии по состоянию теории флотации можно по разработке действенной необходимой для практики теории процесса наметить следующие мероприятия:

а) создание единого плана теоретических работ в области флотации;

б) проведение ежегодных научных сессий поочередно в различных научных учреждениях для обсуждения итогов и дальнейшего плана работ;

в) восстановление и расширение работ по изучению кинетики и механизма элементарного акта флотации в АН СССР, в лабораториях академиков А. Н. Фрумкина и П. А. Ребиндера и чл.-корр. АН СССР Б. В. Дерягина;

г) расширение круга работников для разработки и изучения частных вопросов теории и технологии процесса за счет привлечения к выполнению теоретических работ квалифицированных работников с производства и лабораторий отраслевых институтов;

д) возобновление и расширение работ по изучению кинетики флотации и разработки теории флотации в лабораториях обогащения и физической химии Ленинградского горного института.

5. Признать наиболее актуальными следующие основные направления исследовательских работ по теории флотации:

а) изучение кинетики флотации в конкретных условиях флотационного процесса;

б) изучение совместного действия флотационных реагентов на основе применения новейших методов исследования (радиоактивных индикаторов, электронографии и др.);

в) разработку методов определения ионного состава пульпы и остаточной концентрации флотореагентов в условиях процесса, а также методов оценки состава минеральной поверхности;

г) изучение физики флотационного процесса с восстановлением и расширением работ, использующих методы ускоренной киносъемки;

д) углубление работ по изучению роли газов во флотационном процессе.

VIII. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ДИСКУССИИ ПО ТЕОРИИ ФЛОТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА НА СТРАНИЦАХ ЖУРНАЛА «ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ»

В дополнение к изложенному выше материалу необходимо остановиться на некоторых высказываниях по поводу книги К. Ф. Белоглазова «Закономерности флотационного процесса», опубликованных на страницах советских журналов, а также еще раз вернуться к некоторым вопросам прошедшего семинара-дискуссии в свете новых данных, накопившихся за последние 2—3 года.

В журналах были опубликованы две статьи — А. К. Кузовлева («О путях развития теории флотации») и Н. В. Матвеенко («К вопросу о разработке теории флотации»), содержащие очень смелые заключения.

А. К. Кузовлев считает, например, что простейшая форма уравнения кинетики флотации К. Ф. Белоглазова

$$\lg \frac{1}{1-\varepsilon} = Kt$$

не может быть использована для флотации руды (многоминеральной смеси), а пригодна только для флотации одного минерала. По мнению А. К. Кузовлева, на кинетику флотации извлекаемого минерала в сильной мере влияет соотношение действующих масс этого минерала и породы, что находит выражение в более высоких извлечениях металла в концентрат, получающихся при флотации богатых руд, по сравнению с бедными.

Подобное доказательство не отличается большой строгостью и легко опровергается. Было, например, установлено, что при наличии в руде нескольких разновидностей извлекаемых минералов, флотирующихся с постоянной, но не одинаковой скоростью, суммарные результаты флотации изображаются затухающей кривой в координатах $\lg \frac{1}{1-\varepsilon}$ и время [1]. По данным, характеризующим суммарную кинетику флотации, можно рассчитать константы скорости флотации отдельных разновидностей извлекаемых минералов и их относительное содержание в обрабатываемом материале.

Результаты такого расчета на примере промышленной флотации молибденовой руды убедительно опровергают все предположения А. К. Кузовлева. Действительно, расчеты показывают, что константа скорости флотации легкофлотируемой составляющей руды в цикле основной флотации была равна 0,11—0,19 (данные за три смены). Расчет же константы скорости флотации той же легко флотирующейся составляющей по результатам покамерного опробования первой перечисткой машины дал значения K, изменяющиеся в пределах 0,11—0,16 (за те же смены).

При основной флотации в пульпе присутствуют огромные относительные количества породы. При перечистке концентрата доля молибдена в питании машины возрастает в 30—50 раз. Несмотря на столь большие различия в соотношениях извлекаемого минерала и породы при основной флотации и перечистке концентрата, значения констант скорости флотации в обоих случаях получились одинаковыми. Следовательно, едва ли можно говорить о каком-то влиянии породы на кинетику флотации извлекаемого минерала.

---

[1] Осолодков Г. А. Записки Ленинградского горного института, 1950, т. XXIV

Автор второй статьи Н. В. Матвеенко в развитие прежних своих высказываний о необходимости учета сил отрыва при определении прочности прилипания минеральных частиц к пузырьку воздуха уже полностью отвергает механизм прикрепления частиц к пузырьку, предложенный К. Ф. Белоглазовым. Как можно понять из статьи, главная причина невозможности непосредственного закрепления молекул собирателя, адсорбированных на твердой поверхности в жидкостной пленке пузырька, заключается в том, что молекулы воды отталкиваются от аполярных концов молекул собирателя. Предположение это настолько не обосновано, что не требуется никаких других доказательств несостоятельности этой критики.

Таким образом, обе статьи не содержат замечаний, которые следовало бы учитывать при анализе работ К. Ф. Белоглазова.

Что касается семинара-дискуссии в Горном институте, то в настоящее время необходимо вновь возвратиться к некоторым высказываниям О. С. Богданова.

Как указывалось выше, О. С. Богданов ставил в вину К. Ф. Белоглазову, что при расчете прочности прикрепления минеральных частиц к пузырькам воздуха им не учитываются особые свойства гидратных слоев на минеральных частицах. Кроме того, О. С. Богданов считает ошибочным отождествление К. Ф. Белоглазовым адсорбционных свойств молекул собирателя, находящихся в растворе, и молекул собирателя, закрепленных своими полярными концами на минеральной поверхности. Эти замечания повторяются в различных вариантах в высказываниях многих авторов. Содержатся они, например, также и в книге В. И. Классена и В. А. Мокроусова «Введение в теорию флотации» [1], и, повидимому, их следует признать чуть ли не самыми важными.

Справедливость подобных замечаний как будто вполне очевидна, но, к сожалению, авторы этих замечаний не указывали на величину ошибки, которая получается при принятых К. Ф. Белоглазовым допущениях. Повидимому, ошибки эти не настолько значительны, как можно было предполагать. Подтверждением этого могут служить данные, полученные Г. А. Осолодковым и Г. В. Иллювиевой в течение 1952 г. при исследовании флотируемости углистых веществ растворимыми реагентами. В качестве исходного материала был использован богхед, крупностью 1—0 *мм*. Реагентами служили фенол и капроновая кислота. При исследованиях определялась кинетика флотации, а также (прямыми опытами) величина адсорбции фенола и капроновой кислоты при различных концентрациях реагентов в растворе. Располагая этими данными, можно рассчитать величину γ в уравнении Ленгмьюра двумя независимыми способами.

Как известно, изотерма адсорбции Ленгмьюра может быть представлена в следующем виде:

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

где m — величина адсорбции;

Γ_∞ — предельная величина адсорбции;

c — равновесная концентрация растворенного вещества;

γ — постоянная, характеризующая адсорбционную активность растворенного вещества.

Коэффициент изотермы адсорбции, характеризующий адсорбционную активность коллектора, может быть рассчитан по величине адсорб-

[1] Металлургиздат, 1953.

ции испытуемого реагента, а также, как установлено К. Ф. Белоглазовым, по данным флотационных опытов с этим коллектором.

Опыты и расчеты показали следующее:

1) плотность адсорбционного слоя фенола, отвечающая полному извлечению богхеда, составляет лишь небольшую часть предельной плотности;

2) извлечение богхеда линейно связано с плотностью адсорбционного слоя реагента на богхеде;

3) значения γ уравнения Ленгмьюра, рассчитанные по изотерме адсорбции фенола и капроновой кислоты и по кинетике флотации богхеда этими реагентами, близки между собой.

Сопоставление значений адсорбционных постоянных, вычисленных двумя методами, приведено в табл. 1.

Таблица

Реагент	Адсорбционная постоянная изотермы Ленгмьюра	
	по кинетике флотации	по величинам адсорбции
Фенол	7,3—7,7	22,2
Капроновая кислота	126—132	188

Отсутствие учета особых свойств гидратных слоев или фиксированных молекул коллектора, как следует из данных таблицы, не вносит больших ошибок в результаты расчетов γ по кинетике флотации. Не вносит, повидимому, существенных ошибок при этом и использование статических констант реагента, характеризующих его адсорбционную активность. Таким образом, одно из основных возражений по поводу работы К. Ф. Белоглазова экспериментально не подтверждается.