

**В.И. Мелик-Гайказян, Н.П. Емельянова, П.С. Козлов,
Т.И. Юшина, А.А. Вишкова, А.В. Королев**

ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕННОЙ ФЛОТАЦИИ

Показано, что исследование механизма ПФ рационально предварять расчетом оптимальных условий проведения эксперимента путем использования результатов численного решения уравнения Лапласа. Показано, что строить теорию флотации рационально только, основываясь на капиллярных представлениях. Измерения рационально проводить в условиях, моделирующих процесс ПФ, и по возможности исключать из измерений архимедову силу пузырька, которая не участвует в балансе сил между свободным пузырьком и прилипшей к нему частицей

Ключевые слова: пенная флотация, методы исследования, уравнения капиллярной физики, беспенная флотация, измерения сил отрыва, измерения краевых углов, снятие релаксационных кривых, измерение поверхностного натяжения.

Семинар № 26

V.I. Melik-Gajkazjan, N.P. Emeljanova, P.S. Kozlov, T.I. Jushina, A.A. Vishkova, A.V. Koroljev
THE ESTIMATION OF INFORMATIVENESS OF VARIOUS METHODS OF RESEARCH OF PROCESS OF FOAMY FLOTATION

It is shown what to build the theory of flotation rationally only, being based on capillary representations. Measurements are rational for spending in the conditions modelling process FF, and whenever possible to exclude from measurements Archimed force of bubble which does not participate in balance of forces between free bubble and the particle which has stuck to them.

Key words: foam flotation, methods of research, the equation of capillary physics, monobubble flotation, measurements of forces of detachment, measurements of contact angles, study of relaxation curves, measurement of a surface tension.

Процесс пенной флотации широко применяется в промышленности с 1902 года, то есть уже более ста лет. Для объяснения процесса привлекались различные представле-

ния, а для исследования сравнительно простые методы, не соответствующие сложности процесса. В результате о механизме пенной флотации сложились противоречивые гипотезы. Этих противоречий авторы учебников и монографий по флотации либо не замечали, либо не могли устранить. В результате во флотации независимо существуют развитая практика и слабая теория, которая не может быть ее реальным подспорьем. Решение вопроса просматривается в историях с предложенной в конце 17 века теорией флогистона, а затем и теплорода, основанных на внешне эффективных и впечатляющих опытах. Эти гипотезы, сменяя одна другую, просуществовали незыблемо в физике и химии почти 150 лет и были **легко** отвергнуты лишь на основе простых **количественных** измерений [1]. Надо заметить, что они тормозили установление закона сохранения энергии при ее переходе от одного вида к другому, а, следовательно, и возникновение термодинамики, первым началом которой является этот закон.

В настоящей публикации делается попытка привлечь к рассмотрению вопросов флотации **количественные** уравнения капиллярной физики [2-5], чтобы устранить имеющиеся противоречия во взглядах на механизм пенной флотации. Тогда на реальной основе станет возможным оценивать информативность как уже используемых, так и новых методов исследования процесса и рационально подбирать реагенты, то есть решать основные задачи большинства работ по флотации. Принят следующий порядок изложения.

Методы нумеруются для удобства их последующего сравнения и обсуждения. Указывается название метода, цель его применения, дается ссылка на литературу, где он с вариантами изложен более подробно, и приводится принципиальная схема использованного устройства, если имеются другие варианты его применения. В конце указывается конкретный **результат**, который можно получить, применив этот метод.

Методы условно подразделяются по трем направлениям.

1. Методы исследования механизма процесса пенной флотации

Учитывая сложность процесса и малость его структурного элемента, то есть системы частица-пузырек, исследование рационально начинать с расчета оптимальных условий измерений сил, действующих между пузырьком и прилипшей к нему подложкой (частицей). Такие расчеты можно проводить на основе результатов численного решения уравнения Лапласа [2-5]. Они кропотливы, трудоемки, но весьма информативны и позволяют в качестве **первого шага** рассчитывать оптимальные условия эксперимента для решения конкретной задачи, например, выяснить, кулоновские или капиллярные силы удерживают микрочастицы на поверхности пузырьков при флотации. Вопрос был дискуссионным практически с самого начала промышленного примене-

ния флотации до недавнего времени и развивался в основном лицами, тяготеющими к коллоидной химии. Вопрос важный также и с позиций принципа подбора реагентов для пенной флотации, а именно нужны ли вообще для нее реагенты, а если нужны, то какие [6, № 5, с.361]? Расчеты позволили (п.1.1) найти оптимальные условия для однозначного экспериментального решения этой проблемы (п.1.2). Ниже рассмотрены еще и другие задачи с целью иллюстрации познавательных возможностей сочетания количественного расчета, основанного на физической теории, и подготовленного прецизионного эксперимента.

1.1 Расчет оптимальных условий установления природы сил, действующих между пузырьком и прилипшей к нему подложкой (первый шаг)

Вопрос ранее решался экспериментальным и расчетным путем (1933 г.), но результаты, по-видимому, устроили не всех. Решим эту проблему иным способом.

На рис. 1 слева изображен контур пузырька диаметром 1,5 мм (форма $Y = -0,075$), рассчитанный посредством уравнения Лапласа, справа – вычисленные капиллярные силы прилипания F_1 и отрыва F_3 , а также гравитационная архимедова сила пузырька F_2 . Свяжем эти силы уравнением (1), в которое дополнительно введем еще силу F_x неизвестной природы

$$F_1 = F_2 + F_3 + F_x \quad (1)$$

Предполагается, что если равенство (1) сохранится при подстановке в него измеренных или вычисленных первых трех сил, то силы F_x нет или ее величина находится в пределах ошибок измерений. Так оно и получилось для относительно крупных пузырьков диаметром 3-5 мм и объемом 20-70 мм³, значительно превышающих средний флотационный пузырек диаметром в 1 мм и объемом 0,5 мм³. Рассчитаем эксперимент для более мелких пузырьков.

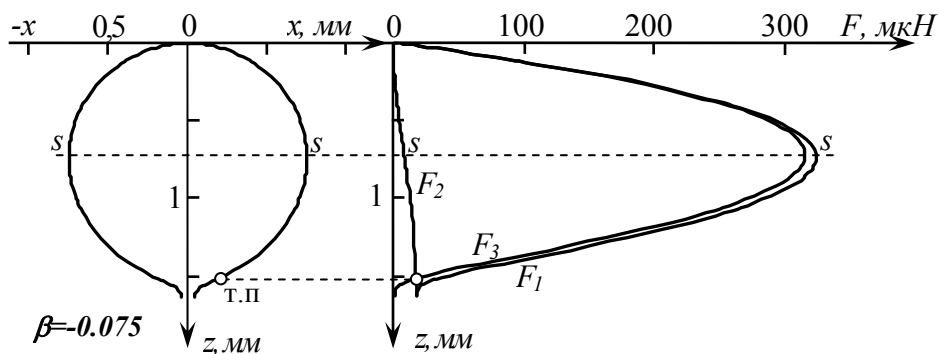


Рис. 1. Меридиональный контур пузырька диаметром 1,5 мм с точкой перегиба (слева) и рассчитанные кривые сил F_1 , F_2 и F_3 , действующих между пузырьком и подложкой (справа)

Цель расчета сил на рис. 1, в том, чтобы найти уровни, на которых, казалось бы, неразделимые силы F_1 и F_3 (например, для уровня $s-s$), зависящие практически от одних и тех же параметров, разделились. **Расчеты** показали, что таковыми являются уровни, лежащие ниже точки перегиба. Эта точка показана на рис. 1 кружочком.

Полученные результаты. Уровни, на которых рационально экспериментально проверять уравнение (1) с целью выявления природы сил, действующих между пузырьком и прилипшей к нему подложкой (частицей), расположены на пузырьке ниже точки перегиба.

Очевидно, что такую рекомендацию можно сделать только на основе расчета, выполненного с применением уравнений капиллярной физики.

1.2. К экспериментальному установлению природы сил, удерживающих пузырек на подложке (второй шаг)

На рис. 2 приведены микрофотографии пузырьков водорода по мере их роста до отрыва при электролизе на

Рис. 2. Микрофотографии пузырьков водорода, сделанные по мере их роста при электролизе на торцах платиновых проволочек диаметром 98; 49 и 21 мкм. Объемы пузырьков колеблются от 0,0006 до 1,988 мм³

торцах платиновых проволочек диаметром 98; 49 и 21 мкм, то есть соответствующих размерам флотационных частиц. Пузырьки фотографировались на оригинальной оптической установке В.Д.Токарева (МИСиС) в лучах синего лазера ЛГ-62 с увеличением в 160 раз. Одновременно фотографировался также объект-микrometer для оценки увеличения по горизонтали и вертикали, что необходимо для определения σ , объема пузырька V и действующих сил F_1 , F_2 и F_3 .

Фотографии контуров пузырьков обмерялись на инструментальном микроскопе, а вычисленные силы подставлялись в уравнение Фрумкина-Кабанова [3,с.38; 4,с.15-19]. Относительная

мкм	Этапы роста пузырьков		
98			
49			
21			

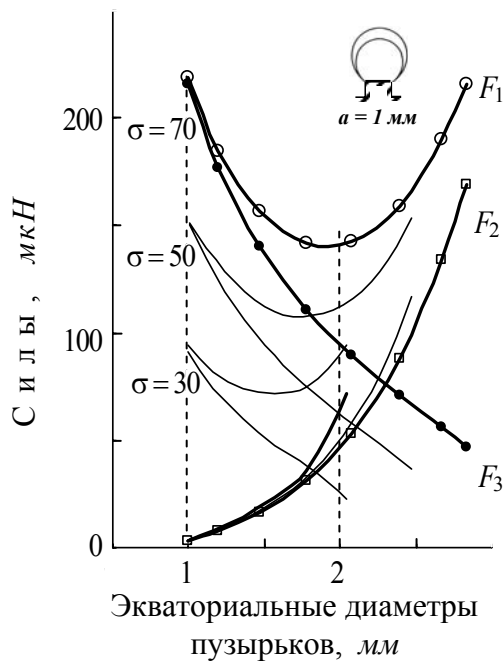


Рис. 3. Силы F_1 , F_2 и F_3 , действующие между пузырьками с различным экваториальным диаметром и подложкой диаметром в 1 мм, рассчитаны на основе уравнения Лапласа для различных σ . Силы F_1 и F_3 , представлены резко расходящимися кривыми

ошибка оказалась в среднем в диапазоне 3-6 %, что может считаться вполне приемлемым из-за использования в расчетах большого числа измеряемых параметров. Таким образом, если сила F_x неизвестной природы, например электростатическая, и входит в уравнение (1), то ее величина может быть только в пределах ошибок измерений.

Полученный результат. Между пузырьком и прилипшей к нему подложкой действуют практически только капиллярные и гравитационная силы. Наличие других сил можно допустить только в пределах точности проведенных измерений.

1.3. Соотношения между силами F_1 , F_2 и F_3 для пузырьков различного размера, закрепившихся на подложке

На рис. 3 приведены силы F_1 , F_2 и F_3 , вычисленные для пузырьков различного размера и с различными σ . Все пузырьки сидят на торце цилиндра диаметром в 1 мм. Аналогичные зависимо-

сти получаются и для случаев пузырьков и подложек меньшего диаметра.

Из приведенных кривых, например для $\sigma = 70$ мН/м, следует, что для закрепления пузырька диаметром в 1 мм требуется сила прилипания $F_1 = 225$ мкН, а для пузырька диаметром в 2 мм с примерно в 8 раз большим объемом – всего 150 мкН, то есть меньше на 30 %.

Этот, казалось бы, странный результат обусловлен большей кривизной у меньшего пузырька и потому большим капиллярным давлением P_k в нем, порождающим большую силу отрыва F_3 и потому большую силу прилипания F_1 .

Расходящиеся кривые F_1 и F_3 на рис.3 получены также и для случая, когда σ на поверхности пузырька равно 50 и 30 мкН/м. Уменьшаются лишь абсолютные значения сил.

Полученные результаты. Прежде всего, иллюстрируется важность учета капиллярного давления P_k газа в пузырьке и роль F_3 в балансе сил между пузырьком и прилипшей к нему подложкой (частицей).

Наличие F_3 позволяет легко объяснить возможность многократного упрочнения контакта системы частица-пузырек в динамических условиях пенной флотации при незначительном росте F_1 . Числовой пример такого упрочнения рассмотрен в [7].

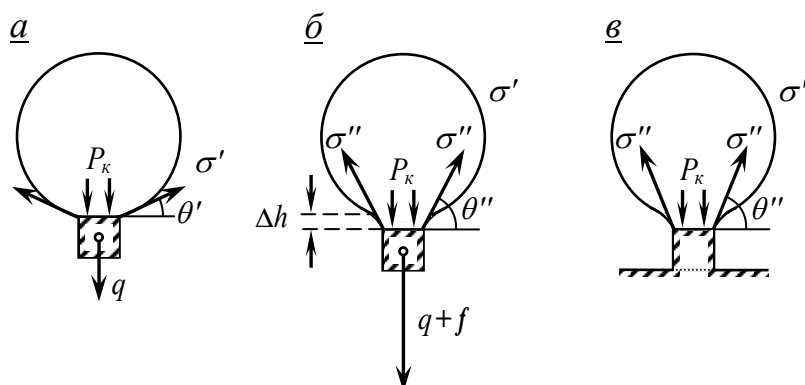


Рис. 4. Обозначения параметров системы пузырек-частица на различных этапах роста сил отрыва q (а), $(q + f) < F_2$ (б) и $q + f = F_2$ (в). Схема (в) соответствует предельному случаю флотации

1.4. К расчету параметров системы **частица-пузырек** для различных условий пенной флотации

Рассматривается способ расчета параметров **свободного** пузырька с прилипшей к нему частицей с весом в воде q (рис. 4, а). При появлении инерционной силы отрыва f схема преобразуется к виду рис. 4, б. В пределе, когда сумма сил $(q + f)$ становится равной F_2 , схема делается статичной (рис. 4, в) и к ее расчету можно применить результаты численного решения уравнения Лапласа для контроля правомерности допущений, принимаемых при расчетах схем (а) и (б). Основные параметры свободного пузырька с прилипшей к нему частицей можно вычислить с хорошим приближением, используя уравнение Фрумкина-Кабанова и первый закон капиллярности. Подробно расчет рассмотрен в [8], а в данной публикации из-за ограниченности ее объема приводятся лишь некоторые его результаты.

Для примера рассматривается свободный пузырек диаметром 0,5 мм с прилипшей к нему торцом цилиндрической частицей диаметром и высотой 100 мкм. Принимается, что на поверхности пузырька $\sigma = 70$ мН/м, плотность воды $\delta_b = 1$ мг/мм³, а плотности частицы в воде δ_r приписываются различные

значения от $(\delta_r - 1) = 1$ до 100 и более мг/мм³, чтобы реализовать различные нагрузки на периметр контакта с пузырьком, которые приводят к росту σ от σ' до σ'' на участке Δh , выгибанию контура пузырька из-за этого и росту θ от θ' до θ'' . Предполагается, что безразлично, чем определяется сила отрыва – дополнительным весом частицы или инерционной силой отрыва f . Вычисляются значения $q, P_k, F_3, F_1, \sin\theta, \theta, R$ и ρ , причем сумма $(1/R + 1/\rho)$ характеризует кривизну поверхности пузырька у периметра контакта, а разность $(1/R - 1/\rho)$ – прочность закрепления частицы на пузырьке. В таблице приведены некоторые результаты из проведенного ранее расчета [8].

В строке 5 таблицы приведены параметры, вычисленные для предельного случая флотации, а в строке 6 – значения, вычисленные на основе решения уравнения Лапласа для пузырька с формой $\beta = -0,00875$, соответствующей рассматриваемому случаю. Представляется, что согласие между результатами, полученными различными способами (графы 5, 7 и 8), более, чем удовлетворительное, и использованный способ расчета приемлем. Более того, развитие данных, содержащихся в гра-

Параметры свободного пузырька с прилипшей к нему частицей при различных нагрузках на периметр контакта

№ п/п	$(\delta_t - 1)$, мг/мм ³	q , мкН	F_3 , мкН	F_1 , мкН	F_3/q	θ°	$1/R - 1/\rho$, м ⁻¹
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0,0077	4,3597	4,3697	566,2	11,455	14
2	5	0,0385	«	4,3982	113,2	11,537	70
3	10	0,0770	«	4,4367	56,6	11,639	140
4	50	0,3848	«	4,7446	11,3	12,460	700
Для предельного случая флотации, когда $q = F_2 = 0,6491$ мкН							
5	84,3	0,6491	«	5,0086	6,7	13,165	1180
Проверка значений для предельного случая, произведенная другим способом							
6	Для $\beta = -0,00875$		«	5,0067	-	13,160	1176

фе 8, позволяет рассчитать упрочнение контакта частица-пузырек при снижении σ на поверхности пузырька. Так, при снижении σ реагентом всего на 0,1 мН/м упрочнение контакта может возрасти в 2,3 раза.

Если при тех же условиях размер частиц будет не 100, а 10 мкм, то упрочнение станет 14-кратным [8]. Поэтому флотация шламов идет не селективно.

Полученные результаты. Тонкие частицы прилипают к пузырькам значительно прочнее крупных. Этот известный из практики вывод, следующий из расчета, в виде обратной связи подтверждает его верность.

Показана возможность оценки величины упрочнения контакта в системе частица-пузырек при весьма малом снижении реагентом σ на поверхности пузырька.

В балансе сил между частицей и свободным пузырьком сила F_2 не участвует.

2. Методы оценки адсорбции и ориентации гетерополярных молекул реагентов в адсорбционном слое на поверхности частиц

Процесс адсорбции рассматривается в связи с необходимостью оценки методов исследования по их способности указывать на ориентацию молекул реагентов в адсорбционном слое на поверхности частиц. В основу положены результаты из фундаментальной работы

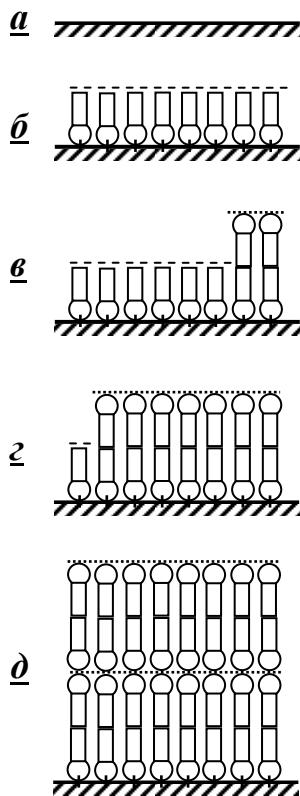
И. Лэнгмюра и его сотрудницы К. Блоджет.

И. Лэнгмюр установил в 1920 г., что слои молекул олеиновой кислоты, сжатые в кювете сконструированных им весов, будучи перенесенными на поверхность чистой стеклянной пластинки, делают ее гидрофобной. Позже, в 1934 г. К. Блоджет продолжила его опыты и обнаружила, что второй нанесенный слой гидрофилизует твердую поверхность. Также гидрофилизуют ее и все последующие слои, которые могут быть только парными.

Рассмотрим эти общие результаты применительно к флотации.

Пусть в воде имеется гидрофильная твердая поверхность минерала (рис. 5, а). В результате хемосорбции гетерополярных молекул собирателя происходит **гидрофобизация** поверхности (схема б). Это энергозатратный процесс, поскольку образующаяся результирующая граница раздела между, например, метильными группами молекул собирателя и молекулами воды (пунктир на схеме) аналогична границе типа гексадекан – вода с энергией порядка 50 мДж/м². Источником энергии для гидрофобизации является химическая реакция между атомом функциональной группы собирателя и атомом на поверхности минерала (связь между ними показана на схемах вертикальными штрихами).

После этого при наличии в растворе избытка молекул такого типа формиру-



ется второй слой (схемы *в* и *г*) в результате физической адсорбции, протекающей самопроизвольно с убылью свободной энергии. Поверхность **гидрофилизуется** и флотирuemость частиц ухудшается. Флотаторы называют такой случай «перемасливанием». Затем при наличии избытка собирателя или других аналогичных ПАВ формируются сразу парные слои, т.е. 3-й и 4-й (схема *д*), 5-й и 6-й и т.д. К. Блуджет показала, что их можно нанести многие сотни, и все они будут гидрофилизировать поверхность, поскольку нет энергетического источника для гидрофобизации поверхности.

Рис. 6. Микрофотографии двух пузырьков водорода одинакового объема, сидящих на ртути. Поверхность правого пузырька слегка загрязнена

Рис. 5. Возможные варианты схем, иллюстрирующие образование адсорбционных слоев из гетерополярных молекул собирателя, приводящих к гидрофобизации (схема б) или гидрофилизации твердой поверхности (схемы г и д)

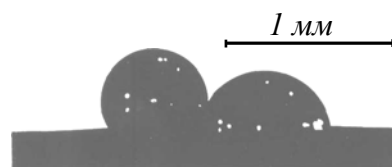
2.1. Измерение краевых углов смачивания θ_p и источник систематической ошибки в получаемых результатах

Измерение краевых углов смачивания θ_p , удовлетворяющих закону Юнга [3, с.30; 4, с.40-48], является, вероятно, самым распространенным после флотоопытов методом исследования действия реагентов при флотации. Рассмотрим результаты измерения этого параметра на основе уравнения Лапласа (1) [2; 3, с.25; 4, с.11-15; 5]

$$\sigma = \frac{\delta g b^2}{\beta}, \quad (2)$$

где δ – разность плотностей граничащих фаз; g – ускорение свободного падения; b – радиус кривизны формы в ее куполе; β – коэффициент, однозначно характеризующий форму симметричного пузырька (капли) и ее удаленность от сферы.

Из уравнения (2) следует, что снижение σ должно неизменно при прочих равных условиях приводить к росту β , то есть, к уплощению пузырька, удалению его формы от сферы и росту наблюдаемого краевого угла, при условии, что периметр пузырька не ограничен размерами подложки. На фотографии рис. 6 изображены два пузырька водорода одинакового объема, выделившиеся электролитически на поверхности ртути.



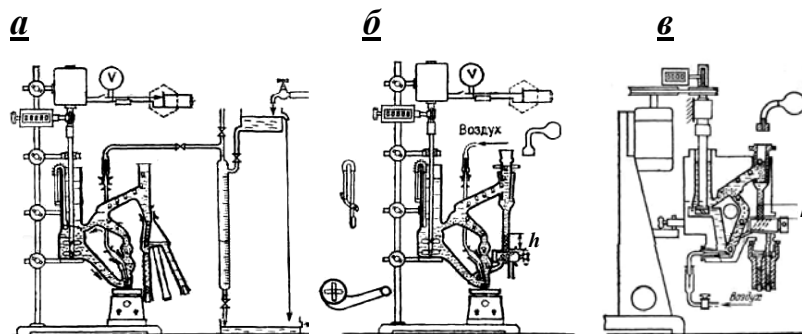


Рис. 7. Беспенные аппараты, выполненные из стекла и в блоке из плексигласа (в), для флотации из турбулентной среды с дробным отбором концентрата (а, в) и с возвратом концентрата для повторной флотации (б, в)

Поверхность правого пузырька слегка загрязнена, и краевой угол у него на 30° больше, чем у левого в полном соответствии с уравнением (2). Следует отметить, что чистота, при которой были получены пузырьки, недостижима при работе с минералами.

Поскольку данные И.В.Уорка по измерению краевых углов на сульфидах и их зависимости от длины радикала в молекуле ксантогената совпадают с данными А.М. Годэна [6, № 6, с.362-364] по флотационной активности ксантогенатов для тех же минералов, то очевидно, что на эту активность оказывает заметное влияние действие ксантогенатов на поверхности пузырьков. И как бы это **утверждение** ни казалось флотаторам ошибочным, это именно так.

Механизм многократного упрочнения контакта частица-пузырек на примере был рассмотрен подробно в [7] (ранее в [3, с.45]). Изложенные там обстоятельства находятся в полном согласии с работой А.Ф. Таггарта и А.М. Годэна [9], из которой следует, что ответственной за упрочнение является величина $\Delta\sigma$, равная разности между динамическим σ_d и статическим σ_p значениями σ на поверхности пузырька и определяемая уравнением (3)

$$\Delta\sigma = \sigma_d - \sigma_p. \quad (3)$$

На основе проведенных измерений и сделанных обобщений эти авторы записали эмпирическое соотношение (4)

$$a = K \cdot (\Delta\sigma)^m, \quad (4)$$

где a – размер флотируемой частицы; K и m – эмпирические константы.

Это весьма правильное соотношение А.Ф.Таггарт также привел и в 1-м издании своего справочника 1927 г. [10], но позднее ни он, ни А.М. Годэн на него больше не ссылались, ибо без учета капиллярного давления P_k газа в пузырьке (а они им пренебрегали) объяснить его невозможно. Но это неважно, уравнение (4) верное, только оно определило свое время. Важно то, что его авторы **правильно** и, возможно, интуитивно связали упрочнение контакта частица-пузырек с поверхностью пузырька и с величиной снижения σ на этой поверхности.

2.2. Беспенная флотация отдельных классов минералов

Беспенная флотация исторически проводится при поисковых исследованиях для экономии минералов и реагентов [11, с.96-97; 12, с.206-210]. Для моделирования условий пенной флотации ее рационально проводить из турбулентной среды. Тогда результаты опытов будут ближе к данным практики. Поэтому вместо обычно применяемой трубки Галлимонта (1944 г.) рекомендуются устройства, изображенные на рис.7 [4, с.26-40].

Ожидаемые результаты. Опыты могут однозначно указать как на

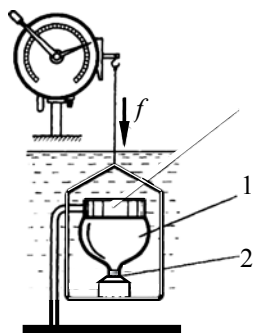


Рис. 8. Схема устройства, использованная для измерения силы f отрыва частицы 2 от пузырька 1 в условиях, моделирующих процесс пенной флотации (см.п.1.4)

адсорбцию используемых реагентов на поверхности частиц, так и на **ориентацию** их адсорбирующихся молекул или ионов на поверхности адсорбционного слоя [5, № 10, с.230-231].

2.3. Опыты пенной флотации

Проведение опытов преследует различные цели и, в частности, для сопоставления получаемых результатов с результатами беспенной флотации п.2.2 [11, с.81-95; 12, с.155-189; 5, № 10, с.229-230].

Получаемый результат. Опыты, по-видимому, могут указать лишь на суммарный эффект действия реагентов.

2.4. Измерения сил отрыва f частиц минерала от пузырьков

Измерения следует проводить в условиях, моделирующих процесс пенной флотации, то есть с исключением из них архимедовой силы пузырька (см.п.1.4) по схеме рис. 8 [4, с.50-56, с.69-74; 5, № 10, с.231-233].

Получаемые результаты. При медленном (равновесном) отрыве опыты позволяют регистрировать не только адсорбцию реагентов на поверхности частиц, но и **ориентацию** адсорбирующихся молекул или ионов реагентов в адсорбционном слое, а также рост поверхностного натяжения σ на вытягиваемых участках поверхности пузырька.

При быстром отрыве частицы требуется увеличение силы отрыва f , и контакт может сохраняться при нали

чий масляной фазы в его зоне [5, № 10, с.232].

2.5. Измерения времени прилипания пузырька к частицам минерала

Созданный в 1934 г. И. Свен-Нильсоном прибор автоматизировал «нулевой метод», использовавшийся для оценки влияния различных реагентов на время прилипания пузырька к частицам [4, с.48-50].

Получаемые результаты. Такие измерения могут показать как адсорбцию, так и **ориентацию** молекул реагентов на поверхности минерала, определить время прилипания τ и влияние на него различных условий, реализуемых во время опыта.

3. Методы оценки адсорбции молекул реагентов на поверхности пузырьков

Свойства поверхности пузырьков определяются реагентами, которые на ней адсорбируются и в сильной мере влияют на прочность закрепления прилипших к ним частиц. Количественно это влияние может быть оценено соотношениями (3) и (4), предложенными А.Ф. Таггартом и А.М. Годэном в 1923 г.

3.1. Бесконтактные, статические методы измерения поверхностного натяжения σ по форме контура симметричного пузырька (капли)

Таких методов много [3, с.25-29; 4, с.10-15, 66-69]. Все они основаны на уравнении Лапласа и результатах его численного решения. Измерения σ позволяют однозначно установить, действует ли используемый реагент на поверхности пузырька или только на поверхности частицы. Именно на основе таких измерений удалось показать, что ксантогенаты адсорбируются на поверхно-

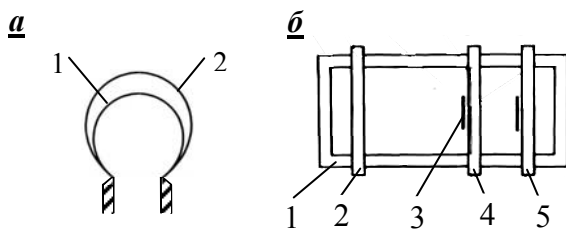


Рис. 9. **а** – пузырек, создаваемый на торце стеклянной трубки и слегка раздуваемый от объема *1* до *2* для снятия кривой $\sigma(t)$; **б** – кювета Поккельс-Лэнгмюра *1* с барьерами *2* и *4* из фторопласта для растягивания пленки реагента на поверхности воды при перемещении барьера *4* в положение *5*; *3* – пластинка Вильгельми, висящая на коромысле электронных весов для измерения поверхностного натяжения

сти пузырьков при флотационных концентрациях порядка 10^{-4} моль/л, а наблюдаемое при этом снижение σ с удлинением радикала удовлетворяет правилу Траубе. Вероятно, именно поэтому и растет их флотоактивность с удлинением радикала в их молекуле (см. п. 2.1) [6, №6, с.362-364].

Бесконтактные измерения σ на поверхности пузырьков позволили бы многим авторам не теряться в догадках, где и как действуют исследуемые ими реагенты, а узнать это однозначно из собственных измерений.

Для измерения σ статическим методом пузырек следует сфотографировать без искажения его формы [4; 13], определить его форму \square посредством совокупности различных несложных измерений, проводимых в определенной последовательности на контуре его меридионального сечения. Затем по формуле Лапласа (2) вычислять σ .

Если фотоаппарат подключен к компьютеру, в котором имеется соответствующая программа, то вся операция с определением σ и прочих параметров пузырька занимает меньше минуты.

3.2. Снятие релаксационных кривых $\sigma(t)$

Снятие кривых $\sigma(t)$ в растворах исследуемых реагентов и, возможно, проб пульп, взятых из процесса [4, с.72-74, 76-78; 5; 7; 13], преследует много целей.

Использовались две разновидности таких измерений, представленных схематически на рис.9.

3.2.1. Релаксационные кривые снимались путем измерения поверхностного натяжения σ по контуру покоящегося сидячего пузырька *1* на торце стеклянной трубки (рис. 9, а) и динамического σ_d по контуру

слегка раздутого пузырька *2* и его контурам во время его возвращения в состояние равновесия в течение времени t_p , то есть времени релаксации [5, 7].

3.2.2. Релаксационная кривая снималась в кювете Поккельс-Лэнгмюра *1* путем измерения σ по методу Вильгельми при растяжении пленки на поверхности воды между барьерами *2* и *4* при внезапном перемещении барьера *4* с заданной скоростью вправо до положения *5* [4, с.76-85].

Поскольку площадь растягиваемой поверхности жидкости в кювете в десятки раз больше площади поверхности раздуваемого пузырька (п. 3.2.1.), то посредством этого метода можно исследовать действие значительно меньших количеств (концентраций) реагентов. Реагенты можно подавать непосредственно на поверхность жидкости между барьерами *2* и *4* и сразу регистрировать результат этой подачи посредством электронных весов, на коромысле которых висит отрываемая от поверхности воды ребром пластинка Вильгельми *3*. Вместо пластинки для повышения точности измерения σ при быстром растяжении пленки используется специально сделанная из фольги граблина [4, с.77].

Получаемые результаты. Опыты позволяют **оценить** свойства реагентов, проявляющиеся в динамических условиях пенной флотации; **оценить** поверхностную и флотационную активности реагентов; **оценить** величину $\Delta\sigma$, важную как в случае флотации крупных частиц, когда она должна быть наибольшей, так и тонких частиц, когда она должна быть минимально значимой для селективного разделения частиц; **оценить** остаточную концентрацию реагентов в пульпе для оперативного ее пополнения и управления процессом.

3.3. Опыты с образованием и разрушением пены

Оценка зависимостей между высотой H образуемой пены и концентрацией C реагента в растворе $H(C)$, между H и величиной $\Delta\sigma$ в растворе, между H и временем t ее разрушения $H(t)$. Предусматривается использование двух способов исследования: метода встряхивания раствора и метода аэрации раствора с различной интенсивностью [14].

Полученные результаты. Опыт показал, что по обоим методикам получаются близкие результаты. Опыт также подтвердил имеющееся в литературе утверждение что максимум H наблюдается при C , соответствующей половине концентрации насыщения раствора реагента [10, с.274-275].

Заключение

По-видимому, наиболее важными для пенной флотации являются следующие три вопроса:

1. Гидрофобизирует ли исследуемый реагент поверхность частиц данного минерала?

2. Гидрофилизует ли реагент поверхность частиц этого или других минералов из числа разделяемых при флотации?

3. Способствует ли реагент повышению прочности контакта частица-пузырек в динамических условиях пенной флотации?

На первые два вопроса можно получить однозначные ответы посредством методов 2.1; 2.2; 2.3; 2.4 и 2.5, причем нагляднее всего посредством методов 2.1; 2.2 и 2.4, а на третий вопрос – посредством методов 3.1; 3.2 и 3.3. По вопросам, связанным с механизмом действия реагентов, наиболее информативными можно считать расчеты по п.1 и методы по пп. 2.2; 2.4; 3.1 и 3.2.

Естественно, авторы знакомы и с другими методами, описанными в литературе, но считают, что эти методы, как правило, слабо моделируют процесс пенной флотации и прямого ответа на первые три вопроса, по-видимому, дать не могут. Дискуссия по этим вопросам может быть очень полезной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Даннеман Ф. История естествознания. Т.3. Расцвет современного естествознания до установления принципа сохранения энергии. Перевод с немецкого. М.:Л.: ОНТИ-НКТП, 1938.–357 с.

2. Bashforth F., Adams J.C. An attempt to test the theories of capillary action by comparing the theoretical and measured forms of drops of fluids. Cambridge, Univercity Press, 1883. - 140 p.

3. Физико-химические основы теории флотации/ О.С.Богданов, А.М.Гольман, И.А.Каковский и др.// М.: Наука, 1983. – 264 с.

4. Методы исследования флотационного процесса //В.И. Мелик-Гайказян, А.А. Абрамов, Ю.Б. Рубинштейн, В.М. Авдохин, П.М. Соложенкин/ М.: Недра, 1990. – 301 с.

5. О капиллярном механизме действия реагентов при пенной флотации, развитии методов его исследования и подбора реагентов. 1. Обоснование выбранных методов исследования процесса// В.И. Мелик-Гайказян, Н.П. Емельянова, П.С. Козлов, Т.И. Юшина, Е.Н. Липная/ ГИАБ, 2008. № 9, с.272-281; № 10, с.228-235.

6. Мелик-Гайказян В.И., Емельянова Н.П. Конкурирующие представления в ра-

ботах по пенной флотации и перспективы их применения для подбора реагентов/ ГИАБ, 2008. № 5, с.358-370; №6, с.355-366.

7. *Релаксационные кривые*, методика их снятия и значение их для понимания процесса пенной флотации и управления им // В.И. Мелик-Гайказян, Н.П. Емельянова, П.С. Козлов, Т.И. Юшина, Е.Н. Липная/ Известия вузов. Цветная металлургия. 2008, № 2, с.6-15.

8. *Мелик-Гайказян В.И., Емельянова Н.П., Пронин В.Т.* К расчету параметров системы частица-пузырек для различных условий пенной флотации/ Обогащение руд. СПб. 1991, № 3, с.16-20.

9. *Taggart A.F., Gaudin A.M.* Surface tension and adsorption phenomena in flotation// Trans.AIME. 1923, v.68, p.479-535.

10. *Таггарт А.Ф.* Справочник по обогащению полезных ископаемых (перевод с англ. изд. 1927 г.). М.: ГНТИ, 1933. Т.2. – 533 с.

11. *Hoover Th.J.* Concentrating ores by flotation. 3-rd ed. London. The Mining Magazine, 1916.- 320 p.

12. *Митрофанов С.И.* Исследование руд на обогатимость. М.: ГНТИ, 1954. – 494 с.

13. *К использованию цифровой технологии для подбора аполярных флотореагентов, оценки их содержания в пульпе и управления процессом*// В.И. Мелик-Гайказян, А.В. Драганов, Н.П. Емельянова, П.С. Козлов, М.И. Труфанов/ ГИАБ, 2006. № 1, с.349-355.

14. *К исследованию процессов образования и разрушения пены на основе снятия релаксационных кривых $\sigma(t)$ на поверхности деформированных пузырьков* //В.И.Мелик-Гайказян, Н.П.Емельянова, П.С.Козлов, М.И.Труфанов, Н.С.Фролов, Т.И.Юшина, Е.Н.Липная/ ГИАБ, 2007. № 9, с.316-324.

ГИАБ

Коротко об авторах

Мелик-Гайказян В.И., Емельянова Н.П., Козлов П.С. – Лаборатория поверхностных явлений и флотации, Курский государственный технический университет, *Юшина Т.И., Вишкова А.А., Королев А.В.* – кафедра обогащения полезных ископаемых, Московский государственный горный университет.



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ			
ПРОХОРОВ Николай	Методы оценки технического состояния ограждающих дамб шламоохрани-	25.00.20	к.т.н.

Николаевич	лиш калийного производства		
------------	----------------------------	--	--