

УДК 622.765

**В.И. Мелик-Гайказян, В.М. Емельянов, А.А. Моисеев,  
В.В. Емельянов, Н.П. Емельянова, Т.И. Юшина,  
М.А. Кулешова**

**О КАПИЛЛЯРНОМ МЕХАНИЗМЕ ДЕЙСТВИЯ РЕАГЕНТОВ  
ПРИ ПЕННОЙ ФЛОТАЦИИ, РАЗВИТИИ МЕТОДОВ  
ЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОДБОРЕ РЕАГЕНТОВ (часть 1)**

*Рассмотрено влияние капиллярного давления  $P_k$  газа в пузырьках размером от 3 мкм до 10 нм, изменяющегося от тысячной доли до нескольких сотен атмосфер, на четыре процесса, связанные с пенной флотацией. Это: 1) коалесценция пузырьков; 2) прилипание пузырьков к твердой поверхности (подложке, частице).*

*Ключевые слова: микропузырьки, капиллярное давление, поверхностное натяжение, коалесценция пузырьков, прилипание пузырьков, флуктуации на поверхности пузырьков, диссипация, фактор интенсивности.*

---

*Сообщение 2<sup>1</sup>. К сопоставлению флотационных свойств милли-, микро- и нанометровых пузырьков на основе уравнений капиллярной физики.*

**1. Предпосылки к исследованию.** Первыми флотационными пузырьками при промышленном использовании пенной флотации были пузырьки, возникающие внутри водной фазы, а именно: 1) пузырьки пара, образующиеся в кипящей воде (процесс братьев Бессель, 1877 г.); 2) пузырьки воздуха, выделяющиеся из воды при понижении давления над ней (вакуумный процесс Ф.Эльмора, 1898 г.); 3) пузырьки углекислоты (CO<sub>2</sub>), получающейся при взаимодействии карбонатов руды с серной кислотой (кислотный процесс Поттера-Дельпра, 1902 г.); 4) пузырьки газов, выделяющиеся при электролизе (процесс Ф.Эльмора, 1904 г.) [1, 2].

То есть, во всех случаях в пульпу поступали маленькие или даже очень

маленькие невидимые глазом пузырьки, возможно, зародышевого размера, которые, судя по результатам процесса, хорошо прилипали к поверхности частиц и извлекали их в пенный продукт. Поданные в пульпу масла интенсифицировали процесс. Считалось, что они гидрофобизируют поверхность частиц. Мы коснемся этого вопроса при рассмотрении флотационного действия аполярных реагентов в п.4.2.

В 1922 г. английский физик Э.Эдсер [3], исследуя процесс Поттера-Дельпра, отметил, что флотационная пена, полученная в процессе, будучи разбита, не может быть восстановлена простым ее перемешиванием, как это легко осуществляется в случае пены, полученной при использовании реагентов.

В 1935 г. шведский исследователь И. Свен-Нильсон экспериментально показал с помощью созданного им прибора, что закрепляющиеся на частицах микропузырьки «катализируют» прилипание к ним других таких же и более крупных пузырьков и тем активируют процесс пенной флотации [4].

**2. Первые обобщения и факторы интенсивности процессов.** Поскольку при применении перечисленных выше процессов не использовались реагенты, способные избирательно изменять смачиваемость поверхности частиц (они еще не были тогда открыты), то, возможно, что именно микропузырьки исполняли роль таких реагентов. Они массово избирательно закреплялись на поверхности частиц, коалесцируя с другими пузырьками, быстро увеличивались, флотировали частицы, создавая подчас необычную безреагентную пену и обеспечивая приемлемые показатели процессов.

Попытаемся на основе уравнений капиллярной физики [5, 6] установить, во-первых, могут ли микропузырьки избирательно закрепляться на подложках (частицах) и, во-вторых, какие из параметров пузырьков (размер, капиллярное давление, поверхностное натяжение  $\sigma$  на поверхности пузырька и др.) могут оказать определяющее влияние в каком-то из перечисленных ниже процессов, связанных с пенной флотацией:

- коалесценция пузырьков;
- прилипание пузырьков к твердой подложке (частице);
- растекание прилипшего пузырька по подложке;
- противодействие закреплению на микропузырьках гидрофильных, шламистых, породных частиц или отторжение случайно прилипших.

В табл. 1 приведены параметры пузырьков различного размера.

Диапазон изменения форм охватывает 12 порядков от  $-3,15 \cdot 10^{-1}$  до  $-3,5 \cdot 10^{-12}$ . Линейные размеры пузырьков выражаются радиусом кривизны  $b$  их поверхности в куполе и экваториальным диаметром  $d_e$  ( $d_e \approx 2b$ ). Такое двойное выражение размеров пузырьков через  $b$  и  $d_e$  обусловлено тем, что для восприятия привычнее  $d_e$ , а для расчетов необходимо  $b$ , так как именно оно входит в уравнение Лапласа и является масштабом к таблицам безразмерных результатов численного решения уравнения. В табл. 1 эти параметры меняются в диапазоне 6-ти порядков, т.е. в миллион раз, что должно помочь установить истинные причины различий в свойствах и поведении пузырьков с изменением их размера. Для наглядности значения  $d_e$  в табл. 1 размещены в трех графах (4.1; 4.2 и 4.3) соответственно для милли-, микро- и нанометровых пузырьков.

В графах 5 и 6 содержатся вычисленные значения капиллярных давлений  $P_k$  газа в пузырьках. Давление указано в Паскалях ( $\text{Н/м}^2$ ) и в атмосферах: первое – для расчета, а второе – для наглядности. Очевидно, что давление газа в пузырьке с  $d_e = 10$  нм в 280 атм. впечатляет сильнее, чем  $2,8 \cdot 10^7$   $\text{Н/м}^2$ .

### **3. Факторы, определяющие процесс коалесценции пузырьков**

Коалесценция (слияние) пузырьков играет важную роль при росте прилипших к частицам микропузырьков до размеров, приводящих к флотации частиц.

Рассмотрим два одинаковых сферических пузырька  $A$  и  $B$ . Каждый диаметром  $d_1$ , с капиллярным давлением газа  $P_1$ , объемом  $V_1$ , площадью поверхности  $\Pi_1$ . В результате их коалесценции (начало показано на рис. 1) образуется пузырек  $M$  с бóльшим

Таблица 1

**Расчитанные параметры сидячих пузырьков с формами  $\beta$  в воде при ее поверхностном натяжении  $\sigma = 70$  мН/м**

№ п/п	- □	b, м	d <sub>e</sub> □ 2b,			P <sub>к</sub>	
			мм	мкм	нм	Н/м <sup>2</sup>	атм.
1	2	3	4.1	4.2	4.3	5	6
1	3,15·10 <sup>-1</sup>	1,5·10 <sup>-3</sup>	3			9,3·10 <sup>1</sup>	9,3·10 <sup>-4</sup>
2	1,4 ·10 <sup>-1</sup>	1,0·10 <sup>-3</sup>	2			1,4·10 <sup>2</sup>	1,4·10 <sup>-3</sup>
3	3,5 ·10 <sup>-2</sup>	5 ·10 <sup>-4</sup>	1	1000		2,8·10 <sup>2</sup>	2,8·10 <sup>-3</sup>
4	8,75·10 <sup>-3</sup>	2,5·10 <sup>-4</sup>		500		5,6·10 <sup>2</sup>	5,6·10 <sup>-3</sup>
5	3,15·10 <sup>-3</sup>	1,5·10 <sup>-4</sup>		300		9,3·10 <sup>2</sup>	9,3·10 <sup>-3</sup>
6	1,4 ·10 <sup>-3</sup>	1 ·10 <sup>-4</sup>		200		1,4·10 <sup>3</sup>	1,4·10 <sup>-2</sup>
7	3,5 ·10 <sup>-4</sup>	5 ·10 <sup>-5</sup>		100		2,8·10 <sup>3</sup>	2,8·10 <sup>-2</sup>
8	8,75·10 <sup>-5</sup>	2,5·10 <sup>-5</sup>		50		5,6·10 <sup>3</sup>	5,6·10 <sup>-2</sup>
9	3,15·10 <sup>-5</sup>	1,5·10 <sup>-5</sup>		30		9,3·10 <sup>3</sup>	9,3·10 <sup>-2</sup>
10	1,4 ·10 <sup>-5</sup>	1 ·10 <sup>-5</sup>		20		1,4·10 <sup>4</sup>	1,4·10 <sup>-1</sup>
11	3,5 ·10 <sup>-6</sup>	5 ·10 <sup>-6</sup>		10		2,8·10 <sup>4</sup>	2,8·10 <sup>-1</sup>
12	8,75·10 <sup>-7</sup>	2,5·10 <sup>-6</sup>		5		5,6·10 <sup>4</sup>	5,6·10 <sup>-1</sup>
13	3,15·10 <sup>-7</sup>	1,5·10 <sup>-6</sup>		3		9,3·10 <sup>4</sup>	9,3·10 <sup>-1</sup>
14	1,4 ·10 <sup>-7</sup>	1 ·10 <sup>-6</sup>		2		1,4·10 <sup>5</sup>	1,4
15	3,5 ·10 <sup>-8</sup>	5 ·10 <sup>-7</sup>		1	1000	2,8·10 <sup>5</sup>	2,8
16	8,75·10 <sup>-9</sup>	2,5·10 <sup>-7</sup>			500	5,6·10 <sup>5</sup>	5,6
17	3,15·10 <sup>-9</sup>	1,5·10 <sup>-7</sup>			300	9,3·10 <sup>5</sup>	9,3
18	1,4 ·10 <sup>-9</sup>	1 ·10 <sup>-7</sup>			200	1,4·10 <sup>6</sup>	1,4·10 <sup>1</sup>
19	3,5 ·10 <sup>-10</sup>	5 ·10 <sup>-8</sup>			100	2,8·10 <sup>6</sup>	2,8·10 <sup>1</sup>
20	8,75·10 <sup>-11</sup>	2,5·10 <sup>-8</sup>			50	5,6·10 <sup>6</sup>	5,6·10 <sup>1</sup>
21	3,15·10 <sup>-11</sup>	1,5·10 <sup>-8</sup>			30	9,3·10 <sup>6</sup>	9,3·10 <sup>1</sup>
22	1,4 ·10 <sup>-11</sup>	1 ·10 <sup>-8</sup>			20	1,4·10 <sup>7</sup>	1,4·10 <sup>2</sup>
23	3,5 ·10 <sup>-12</sup>	5 ·10 <sup>-9</sup>			10	2,8·10 <sup>7</sup>	2,8·10 <sup>2</sup>

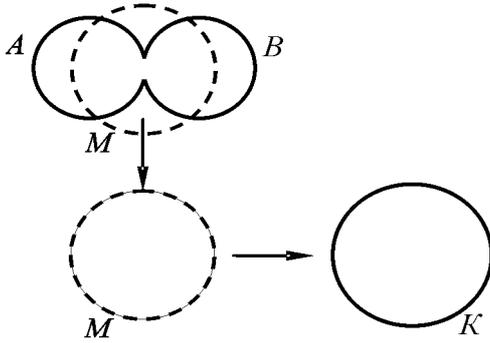
**Примечание:**  $b$  – радиус кривизны в куполе пузырька;  $d_e$  – экваториальный диаметр пузырька;  $P_k$  – капиллярное давление газа внутри пузырька.

диаметром  $d_2$  и потому с меньшей кривизной поверхности и меньшим создаваемым ею капиллярным давлением  $P_2$ , объемом  $V_2$  и меньшей площадью поверхности  $\Pi_2$ , чем у  $A$  и  $B$  вместе взятых. Чтобы отразить неравновесное состояние пузырька  $M$ , контур его показан пунктирной линией. Газ в пузырьке, оказавшись под давлением  $P_2$ , меньшим  $P_1$ , сразу начнет расширяться, а уменьшающаяся при этом кривизна его поверхности способствовать дальнейшему его расширению и росту площади его поверхности. Однако, увеличение площади требует совершения рабо-

ты, и это ограничивает расширение пузырька от  $M$  до  $K$  с диаметром  $d_3$ , капиллярным давлением газа  $P_3$ , объемом  $V_3$  и площадью поверхности  $\Pi_3$ .

Для исследования процесса коалесценции пузырьков и установления фактора, инициирующего его, а также фактора, ограничивающего последующее расширение пузырька  $K$ , следует найти способ определения диаметра  $d_3$  при заданном  $d_1$  исходного пузырька. Результаты проведенного поиска приведены в табл. 2.

Для примера принято, что  $d_1 = 10$  нм, а  $\sigma = 70$  мН/м.



**Рис. 1.** Схема, иллюстрирующая процесс коалесценции пузырьков *A* и *B* в пузырек *M* и его последующее расширение до величины *K*.

Энергия  $G_1$  системы до коалесценции пузырьков *A* и *B* равна объемной энергии ( $P_k \cdot V$ ) газа, заключенного в каждом из них, и сумме поверхностных энергий ( $\sigma \cdot \Pi$ ) каждого пузырька:

$$G_1 = 2(P_1 \cdot V_1 + \sigma \Pi_1). \quad (1)$$

Вычислим параметры пузырьков, используя закон Лапласа и известные соотношения для сферы:

$P_1 = 4\sigma/d_1$ ;  $V_1 = \pi d_1^3/6$ ;  $\Pi_1 = \pi d_1^2$ .  
Результаты внесем в первую строку табл. 2.

После слияния и образования пузырька *M* энергия  $G_2$ , заключенная в нем, может быть формально рассчитана по уравнению (2)

$$G_2 = (P_2 V_2 + \sigma \Pi_2). \quad (2)$$

Для этого допустим, что в первый момент после слияния пузырьков  $V_2 = 2V_1$  и тогда

$$d_2 = d_1 \sqrt[3]{2} = 10 \cdot 1,25992 = 12,5992 \text{ нм.}$$

Вычисленные значения параметров для неравновесного пузырька *M* в начальный момент его «жизни» приведены во второй строке табл. 2.

Поскольку самопроизвольные процессы идут с убылью свободной энергии системы, а величины  $P_1 V_1$  и  $\sigma \Pi_1$  в графах 7 и 8 (строка 2) понизились на одинаковую величину (21%), то при-

нято считать, что способствуют коалесценции в равной мере убыль как  $P_1 V_1$ , так и  $\sigma \Pi_1$ .

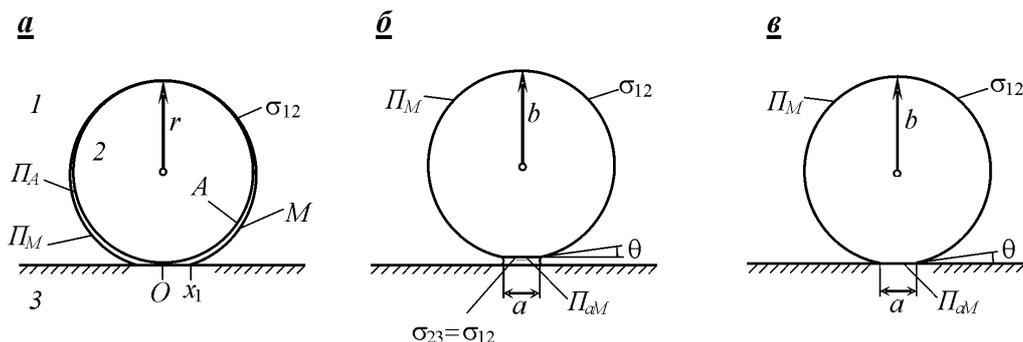
После слияния пузырек *M* начнет расширяться и за изменением его параметров можно проследить, последовательно увеличивая значения  $d_2$  до 14,00; 14,10; 14,14 нм и таким образом подойти к параметрам пузырька *K*, для которого энергия  $G_3$ , вычисляемая по уравнению (3), не может быть больше  $G_1$  (ей просто не откуда взяться), то есть  $G_3 \leq G_1$ .

$$G_3 = (P_3 V_3 + \sigma \Pi_3). \quad (3)$$

Расчеты, проведенные с пузырьками других размеров (10 мкм и 1 мм), показали аналогичные результаты, однако, в первом случае падение  $P_k$  между пузырьками *A* и *K* равно 82 атм., во втором – 0,082 атм., а в третьем  $0,082 \cdot 10^{-2}$  атм., что составляет 5 порядков и однозначно указывает, что чем меньше пузырьки, тем вероятнее для них коалесценция.

Рост тенденции к коалесценции пузырьков с убылью их размера можно выразить также ростом величины удельной энергии рассеяния (диссипации) при этом процессе. Для этого величину  $P_k$  в Н/м<sup>2</sup> следует умножить и поделить на объем  $V$  пузырьков. Тогда удельная энергия рассеяния при коалесценции пузырьков диаметром в 10 нм, 10 мкм и 1 мм окажется соответственно равной  $8,2 \cdot 10^6$ ;  $8,2 \cdot 10^3$  и  $82 \text{ Дж/м}^3$ , т.е. уменьшится на 5 порядков.

Из данных табл. 2 следуют два вывода: 1) фактором интенсивности, т.е. фактором, указывающим направление процесса коалесценции, является капиллярное давление  $P_k$  газа в пузырьке. На всех этапах процесса  $P_k$  лишь уменьшается, инициируя процесс; 2) фактором, ограничивающим расширение образовавшегося пузырька *M* до *K*, является величина предельной площади его поверхности  $\Pi_3 = 2\Pi_1$ .



**Рис. 2. Схема прилипания маленького сферичного свободного пузырька *A* (а) к гидрофильной (б) и предельно гидрофобной (в) подложке (частице)**

Последнее равенство позволяет вычислить диаметр  $d_3 = d_1 \cdot 2$ .

Процесс коалесценции можно затормозить реагентами, например пенообразователем, или полностью исключить, понизив величину  $\sigma$  на поверхности пузырька практически до нуля, как это реализуется в Природе на поверхности живых клеток и оргanelл специальными двойными адсорбционными слоями – мембранами [7, с.325].

#### **4. Факторы, определяющие процесс прилипания пузырьков к подложке**

Рассмотрим прилипание маленького пузырька к подложке (частице). Подведем мысленно к горизонтальной гладкой твердой поверхности маленький сферичный пузырек *A* в точке «*O*» (схема на рис. 2, а). Это первый этап на пути к прилипанию. Пропустим второй этап, т.е. само прилипание, и рассмотрим третий этап, когда прилипание состоялось, и образовался периметр контакта с малым радиусом  $Ox_1$ . Контур пузырька примет вид *M* с формой  $-\beta$ , описываемой уравнением Лапласа. Заметим, что если пузырек прилипает к гидрофильной подложке, то на границе раздела пузырек-подложка появляется тонкая прослойка жидкости (рис. 2, б), впервые экспериментально обнаруженная в 1932 г.

на ртути А.Н.Фрумкиным с сотрудниками [8].

В случае гидрофобной подложки (поверхность ртути в точке ее нулевого заряда) пленка воды под пузырьком не образуется, поскольку она разрывается на отдельные мелкие капельки жидкости [9] (рис. 2, в). Необходимо заметить, что, изменяя величину скачка потенциала между поверхностью ртути и прилегающей к ней жидкостью, можно плавно перейти от гидрофобной ее поверхности к гидрофильной, причем в исключительно чистых и легко контролируемых условиях [11, № 5, с.362-365].

Используя результаты численного решения уравнения Лапласа, обсчитаем схемы, приведенные на рис. 2, для пузырьков различного размера и формы. На рис. 2 приняты следующие обозначения: 1, 2, 3 – водная, газообразная и твердая фазы;  $\sigma_{12}$  – поверхностное натяжение на границе пузырек-вода до и после прилипания (поначалу рассмотрим такой упрощенный вариант);  $\sigma_{23}$  – поверхностное натяжение границы водной прослойки с воздухом пузырька;  $P_A$  и  $P_M$  – площади поверхности пузырька соответственно до и после прилипания;  $P_{aM}$  – площадь границы пузырек-подложка;  $r$  – радиус пузырька *A*;  $b$  – радиус кривизны прилипшего пузырька

Таблица 2

**Результаты расчета параметров процесса коалесценции пузырьков (по схеме рис. 1)**

№ п/п	Пузырьки	$d_e$	$P_k$ , атм	$V$ , м <sup>3</sup>	$\Pi$ , м <sup>2</sup>	$P_k \cdot V$ , Дж	$\sigma \Pi$ , Дж	$G = P_k \cdot V + \sigma \Pi$ , Дж	$\frac{\Delta P_k \cdot V}{V}$ , Дж/м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	А и В	<b>10 нм</b>	280,0	5,236·10 <sup>-25</sup> /* 10,472·10 <sup>-25</sup> **	3,142·10 <sup>-16</sup> /* 6,283·10 <sup>-16</sup> **	2,932·10 <sup>-17</sup>	4,398·10 <sup>-17</sup>	7,330·10 <sup>-17</sup>	
2	М	12,599	222,2	10,472·10 <sup>-25</sup>	4,987·10 <sup>-16</sup>	2,327·10 <sup>-17</sup>	3,491·10 <sup>-17</sup>	5,818·10 <sup>-17</sup>	
3	К	14,140	198,0	14,803·10 <sup>-25</sup>	6,281·10 <sup>-16</sup>	2,932·10 <sup>-17</sup>	4,398·10 <sup>-17</sup>	7,330·10 <sup>-17</sup>	
4	Итоги	Рост на 29,3%	©(Σi)/Σi Σi < i <b>82</b> %/Σi < i 29,3%						8,2·10 <sup>6</sup>
5	А и В	<b>10 мкм</b>	0,2800	5,236·10 <sup>-16</sup> /* 10,472·10 <sup>-16</sup> **	3,142·10 <sup>-10</sup> /* 6,283·10 <sup>-10</sup> **	2,932·10 <sup>-11</sup>	4,398·10 <sup>-11</sup>	7,330·10 <sup>-11</sup>	
7	М	12,599	0,2222	10,472·10 <sup>-16</sup>	4,987·10 <sup>-10</sup>	2,327·10 <sup>-11</sup>	3,491·10 <sup>-11</sup>	5,818·10 <sup>-11</sup>	
8	К	14,140	0,1980	14,803·10 <sup>-16</sup>	6,283·10 <sup>-10</sup>	2,932·10 <sup>-11</sup>	4,398·10 <sup>-11</sup>	7,330·10 <sup>-11</sup>	
9	Итоги	Рост на 29,3%	©(Σi)/Σi Σi < i <b>0,082</b> %/Σi < i 29,3%						8,2·10 <sup>3</sup>
10	А и В	<b>1 мм</b>	2,80·10 <sup>-3</sup>	5,236·10 <sup>-10</sup> /* 10,472·10 <sup>-10</sup> **	3,142·10 <sup>-6</sup> /* 6,283·10 <sup>-6</sup> **	2,932·10 <sup>-7</sup>	4,398·10 <sup>-7</sup>	7,330·10 <sup>-7</sup>	
11	М	1,260	2,22·10 <sup>-3</sup>	10,472·10 <sup>-10</sup>	4,987·10 <sup>-6</sup>	2,327·10 <sup>-7</sup>	3,491·10 <sup>-7</sup>	5,818·10 <sup>-7</sup>	
12	К	1,414	1,98·10 <sup>-3</sup>	14,803·10 <sup>-10</sup>	6,281·10 <sup>-6</sup>	2,932·10 <sup>-7</sup>	4,397·10 <sup>-7</sup>	7,329·10 <sup>-7</sup>	
13	Итоги	Рост на 29,3%	Уменьшение $P_k$ на <b>0,00082</b> атм. или на 29,3%						82

\* / Для одного пузырька А или В;

\*\* / Для двух пузырьков А и В.

$M$  в его куполе;  $a$  – диаметр основания пузырька;  $\theta$  – угол наклона поверхности пузырька к горизонту у его основания.

Поскольку толщины прослоек воды на отдельных частицах неизвестны, то в расчетах рассматриваются два предельных случая. Первый случай с гидрофильной подложкой (рис. 2, б), когда толщина прослойки настолько велика, что поверхностное натяжение на ее границе с воздухом пузырька  $\sigma_{23} \approx \sigma_{12}$  [10; 11, с.12-14]. Этот случай наиболее неблагоприятный для прилипания. Второй предельный случай изображен на рис. 2, в. Он соответствует условию предельной гидрофобности подложки, наиболее благоприятному для прилипания и флотации.

Естественно, что сделанные допущения могут не соответствовать реальности, но все реальные случаи расположатся веером между рассматриваемыми предельными.

Рассмотрим теперь пропущенный ранее второй этап прилипания пузырька к подложке. Воспользуемся данными табл. 1 и 3, в которых приведены характеристики пузырьков для широкого диапазона форм с точкой перегиба на их контурах. Отметим, что в этой точке угол  $\varphi$  между нормалью к поверхности и осью симметрии максимален, а краевой угол  $\theta = 180 - \varphi$  минимален. То есть,  $\theta$  – это минимальный угол, при котором пузырек данного объема  $V$  и формы  $-\beta$  может закрепиться на подложке, если этот угол будет меньше или равен углу  $\theta_p$  ( $\theta \leq \theta_p$ ), характеризующему смачиваемость подложки (частицы) водой и удовлетворяющему закону Юнга.

Выберем для расчета пузырьки с диаметрами  $d_e$ , равными 3 мм; 300, 30, 3 мкм; 300 и 30 нм. Им соответствуют значения  $\beta$ , равные  $-3,15 \cdot 10^{-1}$ ;

$-3,15 \cdot 10^{-3}$ ;  $-3,15 \cdot 10^{-5}$ ;  $-3,15 \cdot 10^{-7}$ ;  $-3,15 \cdot 10^{-9}$  и  $-3,15 \cdot 10^{-11}$ . Расчет начнем с самого большого из них. Его параметры содержатся в табл. 1 и в табл. 3, в которой они выделены жирным шрифтом. Это:  $d_e = 3 \cdot 10^{-3}$  м;  $\theta = 60,63^\circ$ ;  $a = 2,0533 \cdot 10^{-3}$  м;  $V = 2,0086 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>;  $\Pi_M = 3,3094 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>;  $P_{кМ} = 93,33$  Н/м<sup>2</sup> ( $9,333 \cdot 10^{-4}$  атм.), площадь контакта пузырька с подложкой  $\Pi_{аМ} = 3,3145 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup> и  $f'_{12} = 0,07$  Н/м.

Чтобы определить параметры пузырька  $A$  (сферы с  $\beta = 0$ ), который при прилипании превратится в пузырек  $M$ , необходимо найти диаметр  $d_c$  сферы с объемом, равным объему пузырька  $M$ , т.е.  $V = 2,0086 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>. Получим  $d_c = 3,3726 \cdot 10^{-3}$  м; капиллярное давление  $P_{кА} = 83,0220$  Н/м<sup>2</sup>; площадь поверхности сферы  $\Pi_A = 3,5734 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>. Энергию  $G_A$  пузырька  $A$  вычислим посредством тождества (4):

$$G_A = P_{кА} \cdot V + \sigma \Pi_A = 83,0220 \times 2,0086 \cdot 10^{-8} + 0,07 \cdot 3,5734 \cdot 10^{-5} = 4,1690 \cdot 10^{-6} \text{ Дж. (4)}$$

Для пузырька  $M$  в зависимости от того, будет подложка гидрофильной (рис. 2, б) или гидрофобной (рис. 2, в), получаются два значения  $G_{МФ}$  и  $G_{МГ}$  соответственно, вычисляемые посредством тождеств (5) и (6):

$$G_{МФ} = P_{кМ} V + \sigma (\Pi_M + \Pi_{аМ}) = 93,33 \cdot 2,0086 \cdot 10^{-8} + 0,07 \cdot (3,3094 \cdot 10^{-5} + 3,3145 \cdot 10^{-6}) = 4,4232 \cdot 10^{-6} \text{ Дж. (5)}$$

$$G_{МГ} = P_{кМ} V + \sigma \Pi_M = 93,33 \times 2,0086 \cdot 10^{-8} + 0,07 \cdot 3,3094 \cdot 10^{-5} = 4,1912 \cdot 10^{-6} \text{ Дж. (6)}$$

Индекс " $\Phi$ " у  $G_{МФ}$  в тождестве (5) ассоциируется с А.Н. Фрумкиным, поскольку жидкостная прослойка между пузырьком и подложкой (ртутью) была обнаружена благодаря нему и ее особые свойства установлены им [10]. В упрощенном варианте они рассмотрены в [11].

Значения  $G_A$ ,  $G_{M\phi}$  и  $G_M$  для других  $\beta$  и  $\sigma$  рассчитаны аналогичным образом и внесены в табл. 4, которая состоит для каждого  $\beta$  из двух частей: верхней, относящейся к пузырьку  $M$ , и нижней, относящейся к пузырьку  $A$  (рис. 2, а). Такое размещение результатов обусловлено тем, что исходные данные для пузырьков  $A$  получаются из результатов численного решения уравнения Лапласа для пузырька  $M$  с формой  $-\beta$ .

В процессе прилипания пузырек  $A$  может самопроизвольно превратиться в пузырек  $M$ , если  $G_A > G_M$  в соответствии с соотношением (7)

$$\Delta G = G_M - G_A < 0. \quad (7)$$

В случае, когда  $G_A = G_M$ , для прилипания, возможно, потребуется некоторая флуктуация у периметра контакта в виде, например, интенсивного движения на поверхности пузырька из-за колебаний в значениях  $\sigma$  на отдельных участках его поверхности (см.п. 4.2). Если  $G_A < G_M$ , то для прилипания потребуется некоторое внешнее воздействие на систему (см.п.4.1), например, применение соответствующих собирателей.

Табл. 4 составлена так, чтобы из содержащихся в ней данных было видно, в каких случаях прилипание возможно, а в каких энергетически затруднено. Например, пузырек  $A$  (графа 11, строки 4-5) может энергетически сравнительно легко перейти в  $M$ , то есть прилипнуть к гидрофобной подложке (графа 11, строки 2-3) и не столь просто к гидрофильной подложке (графа 12). То же самое относится и к пузырькам  $A$  (графа 11, строки 10-12) и  $M$  (графа 11, строки 8-9). Прилипание к гидрофильной подложке может стать более реальным, если на поверхности пузырька будут заметные колебания в  $\sigma$ .

Для пузырьков  $A$  меньшего размера, переходящих в  $M$  с формами от  $\beta$

$= -3,15 \cdot 10^{-5}$  до  $\beta = -3,15 \cdot 10^{-11}$ , прилипание не должно встретить особого затруднения, как это, вероятно, и имело место во флотационных процессах конца 19-го и начала 20-го века (см.п.1). Флуктуации  $\sigma$  на поверхности пузырьков (см.п.4.2) из-за подачи в процесс масла способствовали этому.

Подытожим данные, содержащиеся в табл. 1; 3 и 4.

– С уменьшением размера пузырьков и величины  $-\beta$  сближаются значения энергий  $G_A$ ,  $G_M$  и  $G_{M\phi}$ , т.е. у еще неприлипшего  $A$ , и у прилипшего  $M$  пузырьков.

– С уменьшением размера пузырьков уменьшается смачиваемость, необходимая для их закрепления на твердой поверхности. Так, для закрепления пузырька диаметром 3 мм необходим угол в  $60^\circ$ , 3 мкм -  $0,054^\circ$ , а 30 нм – всего  $0,0008^\circ$ .

– Поскольку с уменьшением  $d_e$  растет  $P_k$ , то фактором интенсивности при прилипании можно, по видимому, считать  $P_k$ .

– В случае относительно крупных пузырьков энергетические затруднения на пути к прилипанию, по-видимому, должны преодолеваются традиционным путем (см.п.4.1).

4.1. Прилипанию пузырьков способствуют реагенты-собиратели, адсорбция которых на твердой поверхности резко уменьшает толщину гидратных слоев на ней. Впервые это показали Б.В.Дерягин с сотрудниками, открывшие эти слои, исследовавшие их свойства и описавшие их в ряде работ в 30-х годах 20-го столетия. В сжатом виде с соответствующей библиографией они обсуждены в [11, с.11-12]. Б.В.Дерягин разработал методику оптического измерения толщин тонких слоев жидкости между пузырьком и подложкой.

**Параметры пузырьков с формами  $-\beta$  в воде, рассчитанные для точек перегиба на контурах пузырьков при поверхностном натяжении  $\sigma = 70$  мН/м**

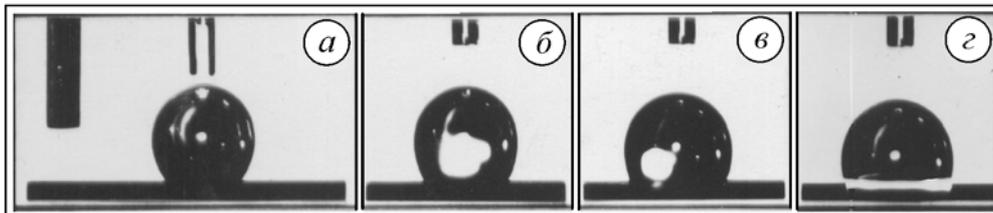
№ п/п	$-\beta$	$b$ , м	$s/b$	$\theta$ , град.	$a$ , м	$H$ , м	$V$ , м <sup>3</sup>	$\Pi$ , м <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	<b><math>3,15 \cdot 10^{-1}</math></b>	<b><math>1,5 \cdot 10^{-3}</math></b>	<b>2,97602</b>	<b><math>6,0626 \cdot 10^1</math></b>	<b><math>2,0543 \cdot 10^{-3}</math></b>	<b><math>3,4639 \cdot 10^{-3}</math></b>	<b><math>2,0086 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b><math>3,3094 \cdot 10^{-5}</math></b>
2	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	3,00986	$3,7295 \cdot 10^1$	$7,1596 \cdot 10^{-4}$	$2,1958 \cdot 10^{-3}$	$4,8673 \cdot 10^{-9}$	$1,3537 \cdot 10^{-5}$
3	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-1}$	3,03752	$1,7778 \cdot 10^1$	$1,5838 \cdot 10^{-4}$	$1,0312 \cdot 10^{-3}$	$5,4259 \cdot 10^{-10}$	$3,1983 \cdot 10^{-6}$
4	$8,75 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	3,07798	8,7904	$3,8583 \cdot 10^{-5}$	$5,0481 \cdot 10^{-4}$	$6,6028 \cdot 10^{-11}$	$7,8886 \cdot 10^{-7}$
<b>5</b>	<b><math>3,15 \cdot 10^{-3}</math></b>	<b><math>1,5 \cdot 10^{-4}</math></b>	<b>3,10050</b>	<b>5,2595</b>	<b><math>1,3799 \cdot 10^{-5}</math></b>	<b><math>3,0119 \cdot 10^{-4}</math></b>	<b><math>1,4182 \cdot 10^{-11}</math></b>	<b><math>2,8320 \cdot 10^{-7}</math></b>
6	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	3,11290	3,5140	$6,1755 \cdot 10^{-6}$	$2,0039 \cdot 10^{-4}$	$4,1947 \cdot 10^{-12}$	$1,2575 \cdot 10^{-7}$
7	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	3,12686	1,7507	$1,5281 \cdot 10^{-6}$	$1,0006 \cdot 10^{-4}$	$5,2378 \cdot 10^{-13}$	$3,1421 \cdot 10^{-8}$
8	$8,75 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	3,13409	$8,7552 \cdot 10^{-1}$	$3,8228 \cdot 10^{-7}$	$5,0008 \cdot 10^{-5}$	$6,5456 \cdot 10^{-14}$	$7,8543 \cdot 10^{-9}$
<b>9</b>	<b><math>3,15 \cdot 10^{-5}</math></b>	<b><math>1,5 \cdot 10^{-5}</math></b>	<b>3,13600</b>	<b><math>5,3654 \cdot 10^{-1}</math></b>	<b><math>1,6927 \cdot 10^{-7}</math></b>	<b><math>3,0002 \cdot 10^{-5}</math></b>	<b><math>1,4138 \cdot 10^{-14}</math></b>	<b><math>2,8275 \cdot 10^{-9}</math></b>
10	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	3,13855	$3,5055 \cdot 10^{-1}$	$6,1357 \cdot 10^{-8}$	$2,0001 \cdot 10^{-5}$	$4,1888 \cdot 10^{-15}$	$1,2566 \cdot 10^{-9}$
11	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	3,14007	$1,7504 \cdot 10^{-1}$	$1,5275 \cdot 10^{-8}$	$1,0000 \cdot 10^{-5}$	$5,2360 \cdot 10^{-16}$	$3,1416 \cdot 10^{-10}$
12	$8,75 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	3,14082	$8,7873 \cdot 10^{-2}$	$3,8678 \cdot 10^{-9}$	$5,0000 \cdot 10^{-6}$	$6,5450 \cdot 10^{-17}$	$7,8540 \cdot 10^{-11}$
<b>13</b>	<b><math>3,15 \cdot 10^{-7}</math></b>	<b><math>1,5 \cdot 10^{-6}</math></b>	<b>3,14111</b>	<b><math>5,3729 \cdot 10^{-2}</math></b>	<b><math>1,4639 \cdot 10^{-9}</math></b>	<b><math>3,0000 \cdot 10^{-6}</math></b>	<b><math>1,4137 \cdot 10^{-17}</math></b>	<b><math>2,8274 \cdot 10^{-11}</math></b>
14	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	3,14124	$3,6930 \cdot 10^{-2}$	$7,0791 \cdot 10^{-10}$	$2,0000 \cdot 10^{-6}$	$4,1888 \cdot 10^{-18}$	$1,2566 \cdot 10^{-11}$
15	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-7}$	3,14144	$1,7505 \cdot 10^{-2}$	$1,5276 \cdot 10^{-10}$	$1,0000 \cdot 10^{-6}$	$5,2360 \cdot 10^{-19}$	$3,1416 \cdot 10^{-12}$
16	$8,75 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	3,14152	$8,7701 \cdot 10^{-3}$	$3,8419 \cdot 10^{-11}$	$5,0000 \cdot 10^{-7}$	$6,5450 \cdot 10^{-20}$	$7,8540 \cdot 10^{-13}$
17	$3,15 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	3,14154	$5,2796 \cdot 10^{-3}$	$1,3963 \cdot 10^{-11}$	$3,0000 \cdot 10^{-7}$	$1,4137 \cdot 10^{-20}$	$2,8274 \cdot 10^{-13}$
18	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-7}$	3,14156	$3,5296 \cdot 10^{-3}$	$6,2683 \cdot 10^{-12}$	$2,0000 \cdot 10^{-7}$	$4,1888 \cdot 10^{-21}$	$1,2566 \cdot 10^{-13}$
19	$3,5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-8}$	3,14158	$1,8421 \cdot 10^{-3}$	$1,7356 \cdot 10^{-12}$	$1,0000 \cdot 10^{-7}$	$5,2360 \cdot 10^{-22}$	$3,1416 \cdot 10^{-14}$
20	$8,75 \cdot 10^{-11}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	3,14158	$9,9120 \cdot 10^{-4}$	$6,326 \cdot 10^{-13}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$6,5450 \cdot 10^{-23}$	$7,8540 \cdot 10^{-15}$
<b>21</b>	<b><math>3,15 \cdot 10^{-11}</math></b>	<b><math>1,5 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b>3,14158</b>	<b><math>8,1579 \cdot 10^{-4}</math></b>	<b><math>3,7961 \cdot 10^{-13}</math></b>	<b><math>3,0 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b><math>1,4137 \cdot 10^{-23}</math></b>	<b><math>2,8274 \cdot 10^{-15}</math></b>
22	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-8}$	3,14158	$7,6956 \cdot 10^{-4}$	$2,5307 \cdot 10^{-13}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$4,1888 \cdot 10^{-24}$	$1,2566 \cdot 10^{-15}$

**Примечание:**  $b$  – радиус кривизны в куполе пузырька;  $s/b$  – координата точки перегиба на контуре пузырька, принятая за уровень его основания;  $\theta$  – краевой угол;  $a$  – диаметр основания;  $H$  – высота пузырька;  $V$  – объем пузырька;  $\Pi$  – площадь криволинейной поверхности пузырька.

Таблица 4

**Результаты расчета параметров процесса прилипания пузырька к подложке (по схеме рис. 1.2)**

№ п/п	$-\beta$	$\theta^\circ$	Пузырьки	$\sigma$ , Н/м	$d_c; d_s$ , м	$P_{KM}; P_{KA}$ , атм	$V$ , м <sup>3</sup>	$P_M; P_A$ , м <sup>2</sup>	$a$ , м	$G_{MG}; G_A$ , Дж	$G_{MF}$ , Дж
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	$3,15 \cdot 10^{-1}$	60,6	С	0,070	$3 \cdot 10^{-3}$	$9,3333 \cdot 10^{-4}$	$2,0086 \cdot 10^{-8}$	$3,3094 \cdot 10^{-5}$	$2,0543 \cdot 10^{-3}$	$4,1913 \cdot 10^{-6}$	$4,4233 \cdot 10^{-6}$
2	"	"	С	0,069	$2,9785 \cdot 10^{-3}$	$9,2664 \cdot 10^{-4}$	$1,9657 \cdot 10^{-8}$	$3,2622 \cdot 10^{-5}$	$2,0396 \cdot 10^{-3}$	$4,0724 \cdot 10^{-6}$	$4,2979 \cdot 10^{-6}$
3	"	"	С	0,068	$2,9568 \cdot 10^{-3}$	$9,1990 \cdot 10^{-4}$	$1,9232 \cdot 10^{-8}$	$3,2149 \cdot 10^{-5}$	$2,0248 \cdot 10^{-3}$	$3,9552 \cdot 10^{-6}$	$4,1742 \cdot 10^{-6}$
4	0	0	С	0,070	$3,3726 \cdot 10^{-3}$	$8,3022 \cdot 10^{-4}$	$2,0086 \cdot 10^{-8}$	$3,5734 \cdot 10^{-5}$	0	$4,1690 \cdot 10^{-6}$	
5	0	0	С	0,069	$3,3484 \cdot 10^{-3}$	$8,2427 \cdot 10^{-4}$	$1,9657 \cdot 10^{-8}$	$3,5224 \cdot 10^{-5}$	0	$4,0507 \cdot 10^{-6}$	
6	0	0	С	0,068	$3,3241 \cdot 10^{-3}$	$8,1827 \cdot 10^{-4}$	$1,9232 \cdot 10^{-8}$	$3,4713 \cdot 10^{-5}$	0	$3,9342 \cdot 10^{-6}$	
7	$3,15 \cdot 10^{-3}$	5,26	С	0,070	$3 \cdot 10^{-4}$	$9,3333 \cdot 10^{-3}$	$1,4182 \cdot 10^{-11}$	$2,8319 \cdot 10^{-7}$	$1,3947 \cdot 10^{-5}$	$3,3059 \cdot 10^{-8}$	$3,3070 \cdot 10^{-8}$
8	"	"	С	0,069	$2,9785 \cdot 10^{-4}$	$9,2664 \cdot 10^{-3}$	$1,3879 \cdot 10^{-11}$	$2,7914 \cdot 10^{-7}$	$1,3847 \cdot 10^{-5}$	$3,2122 \cdot 10^{-8}$	$3,2132 \cdot 10^{-8}$
9	"	"	С	0,068	$2,9568 \cdot 10^{-4}$	$9,1990 \cdot 10^{-3}$	$1,3578 \cdot 10^{-11}$	$2,7510 \cdot 10^{-7}$	$1,3746 \cdot 10^{-5}$	$3,1197 \cdot 10^{-8}$	$3,1207 \cdot 10^{-8}$
10	0	0	С	0,070	$3,0032 \cdot 10^{-4}$	$9,3235 \cdot 10^{-3}$	$1,4182 \cdot 10^{-11}$	$2,8334 \cdot 10^{-7}$	0	$3,3056 \cdot 10^{-8}$	
11	0	0	С	0,069	$2,9816 \cdot 10^{-4}$	$9,2567 \cdot 10^{-3}$	$1,3879 \cdot 10^{-11}$	$2,7929 \cdot 10^{-7}$	0	$3,2118 \cdot 10^{-8}$	
12	0	0	С	0,068	$2,9599 \cdot 10^{-4}$	$9,1894 \cdot 10^{-3}$	$1,3578 \cdot 10^{-11}$	$2,7524 \cdot 10^{-7}$	0	$3,1194 \cdot 10^{-8}$	
13	$3,15 \cdot 10^{-5}$	0,525	С	0,070	$3 \cdot 10^{-5}$	$9,3333 \cdot 10^{-2}$	$1,4138 \cdot 10^{-14}$	$2,8275 \cdot 10^{-9}$	$1,3929 \cdot 10^{-7}$	$3,2987 \cdot 10^{-10}$	$3,2988 \cdot 10^{-10}$
14	"	"	С	0,069	$2,9785 \cdot 10^{-5}$	$9,2664 \cdot 10^{-2}$	$1,3836 \cdot 10^{-14}$	$2,7871 \cdot 10^{-9}$	$1,3829 \cdot 10^{-7}$	$3,2052 \cdot 10^{-10}$	$3,2052 \cdot 10^{-10}$
15	0	0	С	0,070	$3 \cdot 10^{-5}$	$9,3332 \cdot 10^{-2}$	$1,4138 \cdot 10^{-14}$	$2,8275 \cdot 10^{-9}$	0	$3,2987 \cdot 10^{-10}$	
16	0	0	С	0,069	$2,9785 \cdot 10^{-5}$	$9,2663 \cdot 10^{-2}$	$1,3836 \cdot 10^{-14}$	$2,7871 \cdot 10^{-9}$	0	$3,2052 \cdot 10^{-10}$	
17	$3,15 \cdot 10^{-7}$	0,0543	С	0,070	$3 \cdot 10^{-6}$	$9,3333 \cdot 10^{-1}$	$1,4137 \cdot 10^{-17}$	$2,8274 \cdot 10^{-11}$	$1,7797 \cdot 10^{-9}$	$3,2987 \cdot 10^{-12}$	$3,2987 \cdot 10^{-12}$
18	0	0	С	0,070	$3 \cdot 10^{-6}$	$9,3333 \cdot 10^{-1}$	$1,4137 \cdot 10^{-17}$	$2,8274 \cdot 10^{-11}$	0	$3,2987 \cdot 10^{-12}$	
19	$3,15 \cdot 10^{-11}$	0,00082	С	0,070	$3 \cdot 10^{-8}$	93,333	$1,4137 \cdot 10^{-23}$	$2,8274 \cdot 10^{-15}$	$3,7961 \cdot 10^{-13}$	$3,2987 \cdot 10^{-16}$	$3,2987 \cdot 10^{-16}$
20	0	0	С	0,070	$3 \cdot 10^{-8}$	93,333	$1,4137 \cdot 10^{-23}$	$2,8274 \cdot 10^{-15}$	0	$3,2987 \cdot 10^{-16}$	



**Рис. 3. Микрофотографии пузырька воздуха, сидящего в воде на гидрофобизированной поверхности медной фольги. Пояснения в тексте**

Используя ее, английские исследователи Л.Эванс и У.Эверс в 1953 г. показали, причем очень наглядно, что толщина прослойки жидкости между медленно вращающимся в горизонтальной плоскости прозрачным кварцевым диском и прижатым к нему снизу пузырьком резко уменьшается на участках, покрытых катионным собирателем для кварца – триметилцетиламмоний бромидом [15].

4.2. Добавки масла в процесс Поттера-Дельпра улучшили флотацию частиц. Это первым заметил итальянский исследователь А.Фромент и взял в 1902 г. соответствующий патент [1, с.26].

Известно, что добавки аполярного реагента (масла) заметно активируют флотацию частиц с естественно гидрофобными и искусственно гидрофобизированными поверхностями. Механизм прост. Эти реагенты, во-первых, понижают поверхностное натяжение  $\sigma$  на поверхности пузырька и тем заметно повышают прочность контакта частица-пузырек в динамических условиях пенной флотации [13, с.7-8], не изменяя гидрофобности поверхности частиц, поскольку их молекулы не содержат соответствующих функциональных групп; во-вторых, попадание капелек этих реагентов на поверхность пузырьков приводит к интенсивному движению на ней, которое может быть косвенно

проиллюстрировано микрофотографиями на рис. 3.

На рис. 3, а изображен пузырек, сидящий на медной фольге, гидрофобизированной бутиловым ксантогенатом и отмытой после этого дистиллированной водой. Слева виден торец медной проволоки диаметром 0,8 мм, припаянный к подложке для иллюстрации размера пузырька и прочих деталей эксперимента. Над пузырьком виден торец стеклянной микропипетки, закрепленной в манипуляторе и содержащей столбик керосина с водонерастворимым люминофором. Керосин светится зеленым (малахитовым) цветом под влиянием интенсивной ультрафиолетовой радиации (методика эксперимента изложена в [14, с.57-61]). Маленькая капля керосина, выдавленная на поверхность пузырька, видна на нем в виде большого светящегося зеленого пятна с рваными краями (на черно-белом рисунке 3,б оно белое), от которых непрерывно отрываются в виде протуберанцев маленькие светящиеся линзочки реагента и быстро разбегаются во все стороны по поверхности пузырька. Через несколько секунд от пятна остается круглая линза, значительно меньшего размера (рис.3,в). Достигая основания пузырька, реагент линзы растекается вдоль периметра его закрепления в светящуюся каемку (рис. 3, г).

Описание этого опыта имеет своей целью отметить, что капля масла, содержащего ПАВ, попадая на поверхность пузырька, не только снижает величину  $\sigma$  на ней, но и приводит к интенсивному движению поверхности, при котором контур пузырька колеблется и вздрагивает, что, вероятно, способствует прилипанию пузырька к подложке при их соприкосновении. Возможно, что такое движение на поверхности пузырька имеет место и у площади его контакта с подложкой и это не может не способствовать прилипанию пузырька к ней, которое в ряде случаев энергетически оправдано.

Колебания контура пузырька и его вздрагивания можно заметить, если вывести на экран монитора подряд изображения контуров пузырьков при снятии релаксационных кривых  $\sigma(t)$  в водных растворах Т-66. Незаметные при снятии кривой движения на поверхности пузырька делаются при этом очевидными [13, с.11-13]. Такие движения на большой плоской поверхности воды исследовал французский физик Г.Дево [15].

### Заключение

Показано, что капиллярное давление  $P_k$  газа в пузырьках при коалесценции является фактором интенсивности процесса.

Показано, что энергетический барьер на пути процесса прилипания пузырька к подложке снижается с уменьшением размера пузырька, начиная с его диаметра в 300 мкм, и практически исчезает при 30 мкм, даже в отношении гидрофильных подложек.

Показано, что в присутствии масел на поверхности пузырьков происходит интенсивное движение, которое не может не влиять на акт прилипания пузырьков к подложке.

Фактором интенсивности при прилипании рационально считать капиллярное давление газа в пузырьке, которое является функцией от  $\sigma$ .

Предполагается, что в первых флотационных процессах (братьев Бессель, Эльмора, Поттера-Дельпра) микропузырьки со своей повышенной флотационной активностью играли роль современных собирателей.

---

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hoover T.J. Concentrating ores by flotation. 3-rd ed. The Mining Magazine. London, 1916. – 320 p.
2. Сазерленд К.Л., Уорк И.В. Принципы флотации. М.: Metallurgizdat, 1958. – 411 с.
3. Edser E. The concentration of minerals by flotation// Forth Report of Colloid Chemistry. London, 1922. – p.263-326.
4. Свен-Нильсон И. Значение времени соприкосновения между минералом и пузырьком воздуха для флотации //Новые исследования в области теории флотации. Сборник переводов под ред. П.А. Ребиндера. М.: ОНТИ, 1937 - с.134-147.
5. 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.
6. Мелик-Гайказян В.И., Емельянова Н.П., Козлов П.С. Юшина Т.И., Липная Е.Н. и др. О капиллярном механизме действия реагентов при пенной флотации, развитии методов его исследования и подбора реагентов. Сообщение 1. Обоснование выбранных методов исследования процесса // ГИАБ, 2008, № 9, с.272-281; № 10, с.228-235.
7. Ленинджер А.Л. Основы биохимии. М.: Мир, 1985. Т.1. – 367 с.

8. Фрумкин А.Н., Городецкая А.В., Кабанов Б.Н., Некрасов Н.Н. // Электрокапиллярные явления и смачиваемость металлов электролитами. I. // Журн. физ. химии. 1932. Т.3, вып.5-6. С.351-367.
9. Фрумкин А.Н., Городецкая А.В. Об явлениях смачивания и прилипания пузырьков. II. Механизм прилипания пузырьков к поверхности ртути. // Журн. физ. химии. 1938. Т.12, вып.5-6. С.511-520.
10. Фрумкин А.Н. Об явлениях смачивания и прилипания пузырьков. //Журн. физ химии. 1938. Т.12, вып.4. С.337-345.
11. Мелик-Гайказян В.И., Емельянова Н.П. Конкурирующие представления в работах по пенной флотации и перспективы их применения для подбора реагентов // ГИАБ, 2008, № 5, с.358-370; № 6, с.355-366.
12. Evans L.F., Ewers W.E. The process of bubble – attachment //Recent Development in Mineral Dressing. London, 1953, pp.457-464.
13. Мелик-Гайказян В.И., Емельянова Н.П., Козлов П.С., Труфанов М.И., Фролов Н.С., Юшина Т.И., Липная Е.Н. Релаксационные кривые, методика их снятия и значения их для понимания процесса пенной флотации и управления им// Изв.вузов. Цв.металлургия. 2008. № 2. С.6-15.
14. Мелик-Гайказян В.И., Абрамов А.А., Рубинштейн Ю.Б. и др. Методы исследования флотационного процесса. М.: Недра, 1990. – 301 с.
15. Devaux H.E. Oil films on water and on mercury //Annual Report of Smithsonian Institution. 1913, p.261-273. **ГИАБ**

### Коротко об авторах

Мелик-Гайказян В.И., Емельянов В.М., Моисеев А.А., Емельянов В.В., Емельянова Н.П., Юшина Т.И., Кулешова М.А.  
Юго-западный государственный университет (ЮЗГУ),  
Московский государственный горный университет,  
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru



### САМЫЙ ДРЕВНИЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР

Поиск и добыча полезных ископаемых в тюркских языках обозначались словами с корнем «каз», а в индоиранских – с корнем «кан». «Кан» – это и «копать», и «руда». А «кануть», «канава» «канцлер», «канарейка», вошедшие в русский язык, однокоренные слова. Кстати, о канарейках. На протяжении многих веков в шахтах держали канареек для обнаружения газа. Метан или угарный газ убивали птиц раньше, чем их концентрация оказывалась опасной для жизни горняков. К тому же канарейки – певчие птицы, и наступившее вдруг молчание практически сразу становилось заметным.

