

УДК 628.16.081

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА  
АЭРИРУЕМЫХ ПУЗЫРЬКОВ ПРИ ФЛОТАЦИИ**

# 10, октябрь 2012

Байрамова А.Д.<sup>(1)</sup>, Иванов М.В.<sup>(2)</sup>

Аспирант<sup>(1)</sup>, студент<sup>(2)</sup>,  
кафедра «Экология и промышленная безопасность»

Научный руководитель: Ксенофонтов Б.С.,  
д. т. н., профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность»

МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)

**Аннотация**

В настоящей работе рассмотрены некоторые вопросы применения многостадийной модели флотации. В частности, описан новый подход в определении размера пузырька воздуха и, соответственно, константы  $K_1$ . Кроме того, был проведен анализ воздействия вибрации на процесс аэрации пузырьков воздуха в воде при флотации. Он выявил наличие нескольких резонансных частот, на которых отмечается существенное снижение эффективного размера пузырьков воздуха.

**Введение**

В последнее время для описания флотационного процесса используется многостадийная модель [1]. В общем случае, она представлена на рисунке 1 и описывается следующей системой уравнений:

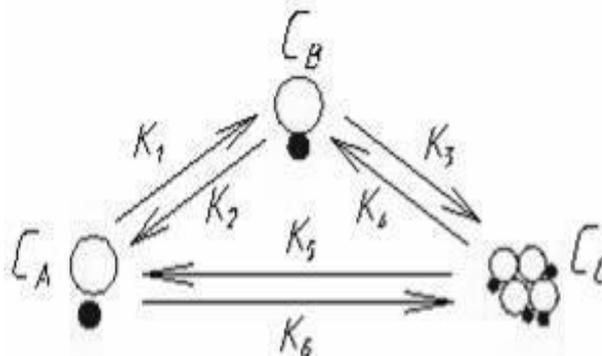


Рис. 1 Схема многостадийного процесса флотации

$$\begin{cases} \frac{dC_A}{dt} = -K_1 C_A + K_2 C_B + K_5 C_C - K_6 C_A \\ \frac{dC_B}{dt} = K_1 C_A - K_2 C_B - K_3 C_B + K_4 C_C \\ \frac{dC_C}{dt} = K_3 C_B - K_4 C_C - K_5 C_C + K_6 C_A, \end{cases}$$

где  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$  – концентрации частиц загрязнения на стадиях А, В и С соответственно;  $K_i$  – константы переходов из одной стадии в другую, которые определяют процесс протекания флотации.

В частности, Константа  $K_1$  характеризует вероятность образования флотокомплекса частица-пузырек в течение времени  $T_0$ :

$$K_1 = \frac{1.5qE}{k_0 \bar{D}}, \quad (1)$$

где  $q$  – скорость барботирования;  $E$  – эффективность захвата частицы загрязнения;  $k_0$  – коэффициент полидисперсности;  $\bar{D}$  – средний диаметр пузырьков воздуха.

Выпадение флотокомплексов из пенного слоя при условии его мгновенного удаления, определяется константами:

$$K_4 = FG_s C_a d_{av}^3, \quad (2)$$

где  $F$  – коэффициент,  $G_s$  – градиент скорости в подпенном слое,  $C_a$  – концентрация пузырьков воздуха в пенном слое,  $d_{av}$  – средний диаметр пузырьков воздуха в пенном слое.

Таким образом, очевидно, что для высоких показателей процесса флотации, необходимо обеспечение малого размера пузырьков воздуха, что является достаточно трудной задачей. Для исследования распределения пузырьков воздуха при флотации была создана следующая лабораторная установка.

### Методы и материалы

Для проведения настоящих исследований была собрана установка, представленная на рисунке 2.

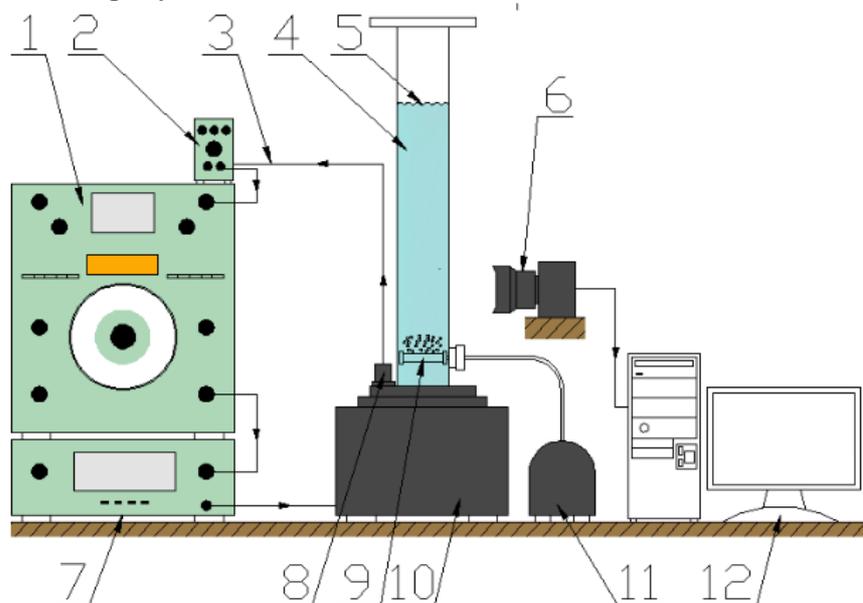


Рис. 2. Общая схема экспериментальной установки

1 – генератор (Brüel&Kjær типа 2010), 2 – предварительный усилитель (Brüel&Kjær типа 2626), 3 – канал отрицательной обратной связи, 4 – корпус колонны, 5 – свободная

поверхность жидкости, 6 – фотоаппарат с макрообъективом, 7 – усилитель мощности (Bruel&Kjaer типа 2718), 8 – акселерометр (Endevco 751), 9 – аэратор, 10 – вибростенд (Bruel&Kjaer типа 4808), 11 – компрессор, 12 – компьютер с принтером и графическим редактором.

Установка состоит из колонны 4 диаметром 110 мм, изготовленной из стеклопластика, которая заполняется жидкостью (водой или модельным стоком) до уровня 5. Уровень заполнения колонны жидкостью равен числу, кратному диаметру колонны и составлял от 3 до 5 ее диаметров. В колонне закреплен аэратор 9, в который компрессором 11 подается воздух. Расход воздуха регулируется. Вибрационное воздействие на объект исследования осуществляется с помощью вибростенда 10 типа 4808 фирмы Bruel&Kjaer. Сигнал на вибростенд подается из генератора 1 типа 2010 через усилитель 7 мощности 2718 фирмы Bruel&Kjaer. Подаваемый сигнал имеет синусоидальную форму и может варьироваться как по амплитуде, так и по частоте в пределах от 20 Гц до 2000 Гц. На корпусе колонны в нижней точке закрепляется акселерометр 8 типа 751 фирмы Endevco, с помощью которого, через предварительный усилитель 2 типа 2626 фирмы Bruel&Kjaer, осуществляется отрицательная обратная связь 3. Таким образом, данный канал являлся задающим.

Фиксация размеров пузырьков производилась с помощью фотоаппарата 6 с макрообъективом. Анализ и подсчет пузырьков воздуха осуществлялись затем в графическом редакторе на компьютере 12.

Исследуемый объем жидкости равен  $0,5 \text{ дм}^3$ .

### **Результаты и обсуждение**

Данные результатов экспериментов сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты экспериментов

Частота, Гц Диаметр, мм	Количество пузырьков воздуха																	
	40	50	55	65	70	80	90	105	110	120	130	135	145	150	155	165	170	Без вибрации
0,1	103	156	382	244	41	227	324	271	578	832	721	417	823	504	580	803	1189	290
0,2	60	71	205	162	122	115	186	121	176	224	160	198	125	190	103	143	784	155
0,3	40	62	182	125	114	110	125	32	68	120	86	98	43	48	80	46	172	137
0,4	46	28	96	52	106	36	54	22	26	29	13	37	24	15	17	27	83	96
0,5	30	17	23	30	21	13	40	13	19	18	12	11	20	13	8	16	28	91
0,6	11	16	2	17	7	2	29	6	7	14	13	6	14	3	13	13	38	27
0,7	21	7	1	13	9	6	11	5	5	10	11	5	8	4	6	5	11	28
0,8	5	1	3	6	12	8	9	4	4	6	3	6	4	3	9	3	11	29
0,9	11	3	3	14	3	4	1	5	3	3	6	6	2	3	4	5	3	11
1	1	5	2	1	9	6	1	2	1	1	2	9	1	1	2	0	10	2
1,1	1	4	1	0	2	2	0	2	2	3	1	1	0	1	0	1	5	3
1,2	1	6	1	6	5	4	3	3	3	1	5	2	0	1	1	1	2	2
1,3	4	4	1	3	7	4	2	6	7	5	3	3	4	2	2	1	0	4
1,4	5	3	3	2	7	1	2	1	3	1	0	2	2	0	0	0	4	7
1,5	3	1	0	1	4	1	1	1	1	2	3	1	1	1	3	0	2	1
1,6	0	1	0	1	2	1	1	1	2	1	2	0	1	1	2	0	1	0
1,7	5	1	2	0	1	0	1	0	1	2	1	0	2	2	0	1	0	0
1,8	3	0	0	0	1	0	5	2	1	1	1	1	2	1	0	0	0	1
1,9	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
2	0	1	0	0	0	0	0	3	0	1	2	1	0	0	0	0	2	0

Распределение аэрируемых пузырьков воздуха в зависимости от их размеров в спокойном состоянии без воздействия вибрации представлен на рис. 3.

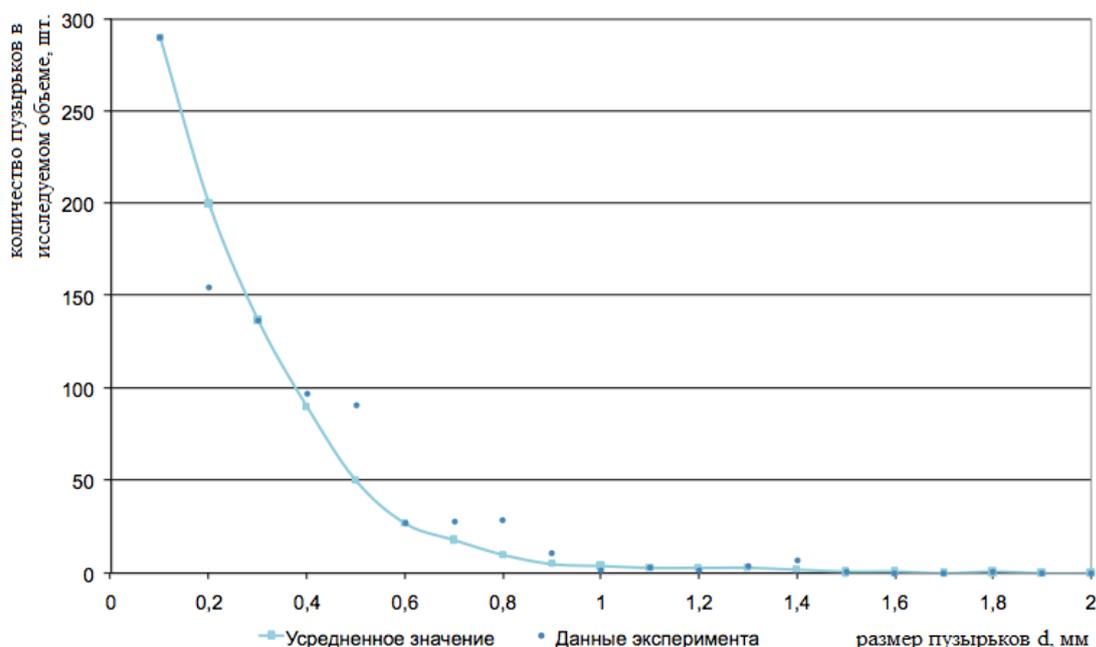


Рис. 3. Распределение пузырьков воздуха по размеру при аэрировании без вибрации. (По оси абсцисс – размер пузырьков, а по оси ординат – их количество)

Как видно из рисунка 3, исследуемый аэратор способен производить пузыри воздуха размером от 0,1 до 2 мм. Таким образом, средний диаметр пузырька, для подстановки в формулу (1) будет составлять:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} = \frac{0,1+0,2+0,3+0,4+0,5+0,6+0,7+0,8+0,9+1+1,1+1,2+1,3+1,4+1,5+1,6+1,7+1,8+1,9+2}{20} = 1,0$$

Однако совершенно очевидно, глядя на рисунок 3, что пузырьки размером 1 мм не оказывают такого существенного значения на процесс флотации, как пузырьки меньшего размера, так как их значительно меньше, что уже было отмечено в [2]. Ввиду этого, при расчете флотационных процессов предлагается учитывать не средний размер пузырька, а эффективный размер, который может быть вычислен следующим образом:  
Эффективный диаметр:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (3)$$

где  $m_i$  – количество пузырьков воздуха диаметра  $d_i$ .

Так, для исследуемого аэратора эффективный размер пузырьков воздуха без учета воздействия вибрации, посчитанный по формуле 3 составляет 0,29 мм.

Однако распределение аэрируемых пузырьков воздуха по размеру существенно изменяется с наложением вибрационного воздействия.

На рисунке 4 представлено распределение количества пузырьков в зависимости от их размера и от частоты вибрационного воздействия.

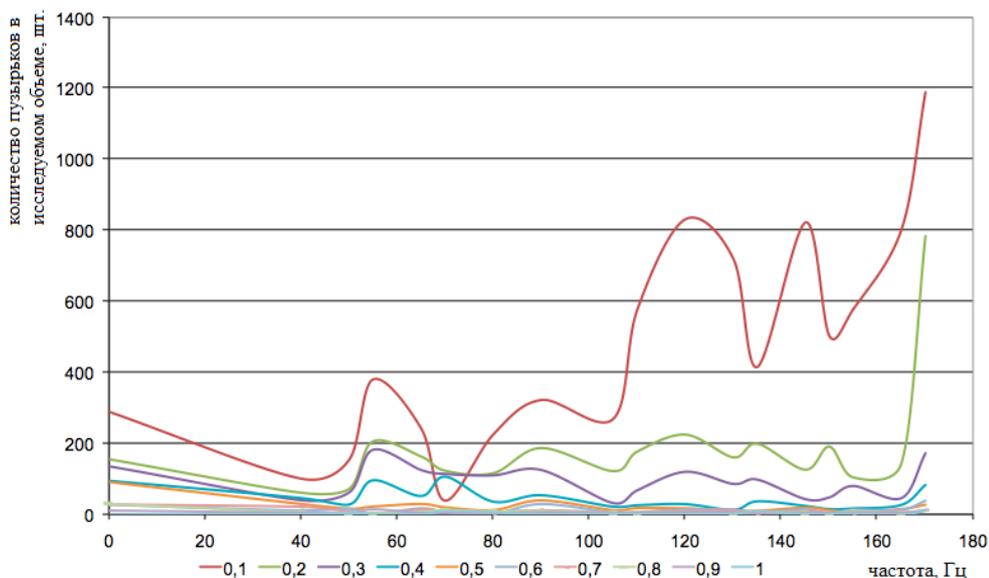


Рис. 4. Распределение количества пузырьков в зависимости от их размера и от частоты вибрационного воздействия

Из рисунка 4 видно, что размерные линии пузырьков в зависимости от частоты вибрации коллинеарны. При этом, имеют место явно выраженные резонансные частоты. Основная резонансная частота для данного аэратора и для данного уровня заполнения колонны водой составляет 170 Гц. Второй резонансной частотой является 120 Гц, а третьей – 55 Гц. Для данных значений частот характерно существенное снижение размеров пузырьков воздуха (при том, что режим работы компрессора не изменяется, равно как и не изменялись никакие прочие параметры).

Для данных резонансных частот было построено распределение количества пузырьков в зависимости от их размеров (рис. 5).

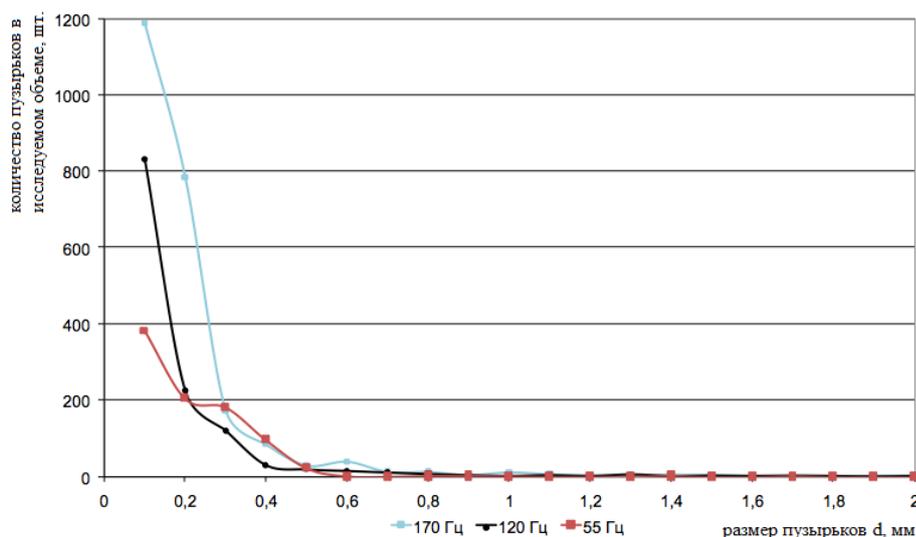


Рис. 5. Распределение количества пузырьков в зависимости от их размеров для резонансных частот 170, 120 и 55 Гц

Расчет эффективных размеров пузырьков дал следующие результаты: Эффективный размер пузырьков воздуха при частоте 55 Гц составляет 0,22 мм, при частоте 120 Гц – 0,17 мм, а при частоте 170 Гц – 0,16 мм.

Таким образом, очевидно, что применение вибрации позволяет уменьшить эффективный размер пузырька воздуха практически в два раза.

### **Выводы**

Подстановка уточненного значения размера пузырьков воздуха в многостадийную модель флотационного процесса, и в частности в формулу (1) позволит производить более точное моделирование процесса. Предлагаемый способ расчета эффективного размера пузырька воздуха значительно отличается от того, что применялся ранее. Он был опробован для оценивания эффективности применения вибрации на процесс аэрации при флотации и показал, что эффективный размер пузырька может быть снижен с 0,3 мм до 0,16 мм.

Кроме того, установлено, что возможно применение вибрационного воздействия на разных частотах, определенных как резонансные частоты.

### **Литература**

1. Ксенофонтов Б.С. Флотационная обработка воды, отходов и почвы. М.: Новые технологии. – 2010. - 272 с.
2. Ксенофонтов Б. С., Иванов М. В., Интенсификация флотационного процесса очистки сточных вод с использованием вибровоздействий. Экология и охрана труда, 201, №1-2, С. 10-16.