

УДК 541.18+532.6

С.И. Евдокимов, А.М. Паньшин

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СИЛ В КОНТАКТАХ
МЕЖДУ ЧАСТИЦАМИ В ВОДЕ**

Семинар № 25

Из множества факторов, определяющих свойства дисперсных систем, можно выделить две основные группы, связанные со следующими параметрами: силой и энергией сцепления (взаимодействия) в контактах между частицами дисперсных фаз; числом контактов между частицами в единице объема. Значение силы (прочности) в контакте между частицами (по Е.Д. Яхнин, А.Б. Таубман):

$$F_k = p_m D^2 \rho V_s \quad (1)$$

где p_m – напряжение (механическое) в точке контакта между частицами, Н/м²; ρ , D – плотность (кг/м³) и диаметр частиц (м); V_s – удельный объем осадка, м³/кг.

В работе удельный объем осадка V_s (см³/г) определяли методом седиментоволюметрии (рис. 1).

На рис. 1 слева схематически изображено начало опыта, а справа – его завер-

шение, когда осадок полностью перешел из верхней емкости (1) в нижнюю (2) и сформировал в самой емкости (2) и в узкой измерительной трубке (3) осадок, удельный объем которого определяют по шкале (8) прибора.

Ребиндером П.А., Кройтом Г.Р. и Китченером Дж. установлено, что в устойчивой суспензии индивидуальные частицы легко переупаковываются тех пор, пока не достигается их наиболее плотная упаковка с минимальным объемом осадка. Наоборот, чем сильнее взаимодействие между частицами, тем больше формируемый ими объем осадка, так как уже первое столкновение частиц заканчивается сохранением их взаимного расположения и они не способны далее занять положение, соответ-

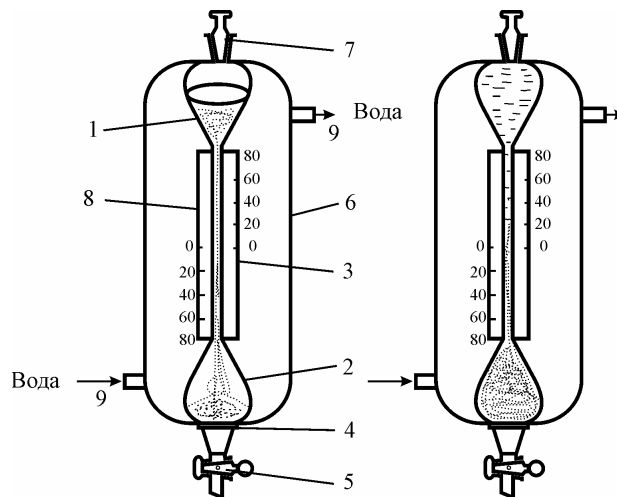


Рис. 1. Прибор для седименто-волюметрических измерений: 1,2 – накопительные емкости; 3 – труба небольшого диаметра; 4 – фильтр Шота; 5 – кран; 6 – термостатирующая рубашка; 7 – пробка; 8 – измерительная шкала; 9 – направление движения воды от термостата

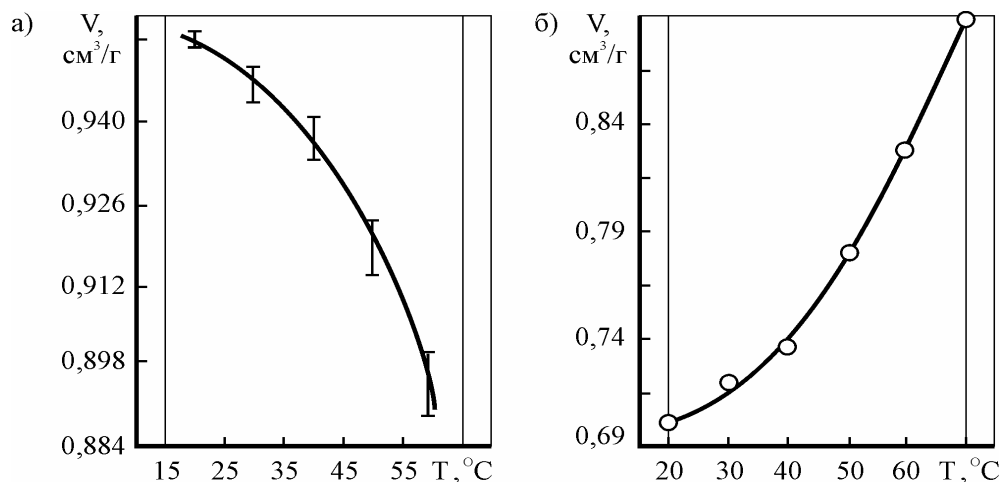


Рис. 2. Экспериментальная (O точками указаны середины доверительных интервалов (линия $V = 4,662 \cdot 10^{-5} T^2 - 5,493 \cdot 10^{-4} T + 0,690$) температурная зависимость удельного объема осадка суспензии кварца (а) и фторопласта Φ-4 (б)

ствующее минимуму потенциальной энергии.

Установлено (рис. 2), что с повышением температуры характер изменения величины удельного объема осадка определяется фильностью (смачиваемостью) частиц дисперсной фазы: он уменьшается для суспензии гидрофильного кварца и увеличивается для суспензии гидрофобного фторопласта.

Теоретической основой метода определения напряжения в точке контакта между частицами в осадке p_m в работе принята статистическая модель гидромеханического процесса фильтрации полидисперсной суспензии.

Формирование столба осадка в измерительной трубке седиментоволюметрического прибора за счет взаимодействия частиц с образованием или, наоборот, разрывом контактов между ними происходит при различной разности давления Δp , т.е. в неравновесных условиях, связанных с проявлением поверхностных сил при контактных взаимодействиях. Таким образом, переход от

состояния "контакт есть" к состоянию "контакт разорван" пропорционально разности давления Δp , при которой произошло формирование осадка. Структура осадка образована многократным повторением одной и той же элементарной ячейки, т.е. некоторой малой не обязательно замкнутой структурной области постоянной формы и размера. При изменении объема меняется лишь размер ячеек, их форма сохраняется. Найдем значение разности давления Δp , при которой в приборе (рис. 1) в динамических условиях происходит контактное взаимодействие анизометричных частиц с образованием из них осадка.

Частичная v и массовая c концентрации суспензии связаны соотношением

$$v = cN = \frac{3}{4} \cdot \frac{c}{\pi \rho} \int_r^{R_{\text{макс}}} \frac{F(R) dR}{R^3} = \varphi(r) ,$$

где полное число частиц в суспензии N получается интегрированием равенства $\frac{4}{3} \pi R^3 \rho dN = F(R) dR$, где $F(R) dR$ –

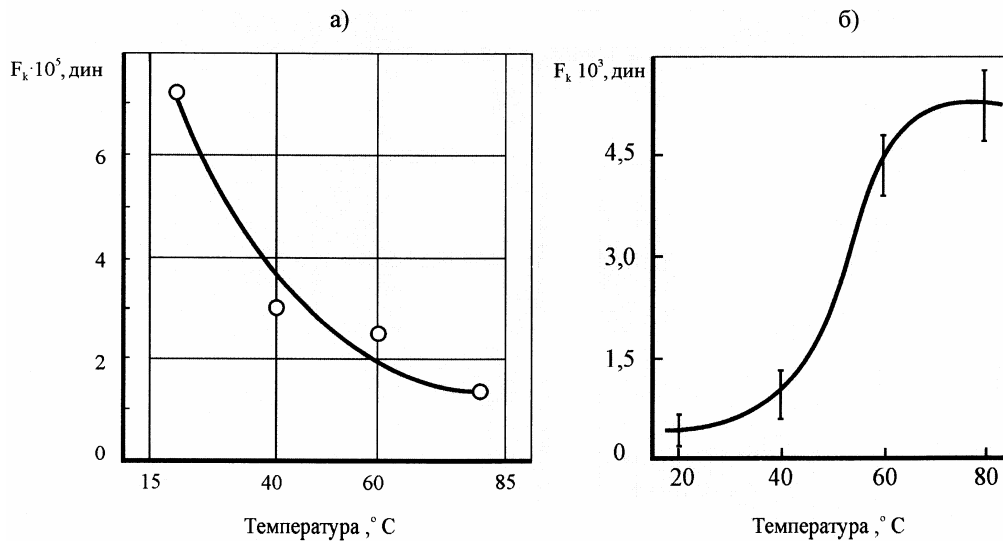


Рис. 3. Зависимость сил контактного взаимодействия между частицами кварца (а) и фторопласта-4 (б) от температуры (О точки принадлежат серединам доверительных интервалов)

массовая доля частиц с радиусом R и функцией распределения по размерам $F(R)$.

Приравняв выражения для секундного потока по всем порам осадка в начальный момент времени

$$q(0) = \frac{\pi \Delta \rho(0)}{8 \mu h} Z \int_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} r^4 dr \quad (2)$$

и к моменту времени t

$$q(t) = \frac{\pi \Delta \rho(t)}{8 \mu h} Z \int_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} r^4 P(r, t) dr, \quad (3)$$

полученным из закона Гагена-Пуазейля

$$\frac{\Delta p}{h} = \frac{8 \mu q}{r_k^4}, \quad (4)$$

вычислим значение p_m из выражения:

$$p_m = \Delta p(t) = \left\{ \Delta \rho(0) Z \int_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} r^4 dr \left[Z \int_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{макс}}} r^4 P(r, t) dr \right]^{-1} \right\} \quad (5)$$

где $r_k = 2Rf$, $f = \left(\frac{4Z^2}{p} - 2Z + 1 \right)^{1/2}$, Z

= $3 \div 9$ – координационное число квази-решетки случайно упакованных сфер;

$P(r, t) = \left(1 - \frac{\pi r^2}{S} \right)^{\varphi(r) \left(t - \frac{H}{v} \right)}$ – вероятность

того, что пора r в осадке, к которой подходит $n(r, t) = \varphi(r) \left(t - \frac{H}{v} \right)$ частиц $R >$

r , к моменту t будет свободна; S – площадь нормального сечения осадка; H/v – время прохождения частицами части аппарата над осадком, где $v = \omega/S$ – линейная скорость движения суспензии.

Опытным путем доказано, что для полиэдрических частиц SiO_2 справедлива зависимость $F_k \sim d^n$ ($d = 10 \div 110$ мкм) с $n \geq 2,2$. Как и величина удельного объема осадка, так и прочность контактов при повышении температуры определяется физико-химическими свойствами поверхности частиц: при контакте гид-

рофильных частиц силы сцепления между ними уменьшаются с ростом температуры; наоборот, силы сцепления между гидрофобными частицами увеличиваются с повышением температуры (рис. 3).

Разброс экспериментальных значений на рис. 3 обусловлен, по-видимому, тем, что по мере увеличения размера частиц (с ростом температуры увеличивается размер агрегатов) возрастает доля контактов, образованных наибольшими гранями. Большинство полиэдрических частиц при падении друг на друга каса-

ются углами и ребрами. Иными словами, проявляется масштабный эффект. После касания частицы начинают поворачиваться и до момента фиксации могут перекатиться через одну-две грани. При таких условиях формирования контактов вероятность переворота частиц через малые грани и, следовательно, вероятность остановки лишь на больших гранях с увеличением массы частиц резко возрастает, что приводит к более сильному разбросу экспериментальных значений. ■■■

Коротко об авторах

Евдокимов С.И. – СКГМИ (ГТУ),

Паньшин А.М. – ОАО «Электроцинк».

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 25 симпозиума «Неделя горняка-2007».

Рецензент д-р техн. наук, проф. *А.А. Абрамов*.



© Э.П. Ячушко, 2008

УДК 622.7:51

Э.П. Ячушко

ОБ УРАВНЕНИИ КАБАНОВА И ФРУМКИНА

Семинар № 25

Это уравнение впервые выведено Кабановым и Фрумкиным для случая, когда воздушный пузырёк в воде прилип к неограниченной твёрдой поверхности, и определяет прочность прилипания воздушного пузырька к твёрдой поверхности в статистических условиях [1].

Условие равновесия пузырька на твёрдой поверхности (см. рис. 1), выражается следующим уравнением:

$$\pi a \sigma_{ж-г} \sin \theta = V q \rho + \frac{\pi a^2}{4} \left(\frac{2\sigma_{ж-г}}{R} - h q \rho \right).$$

где a - диаметр окружности, по которой пузырёк прикоснулся к твёрдой поверх-

ности, м; $\sigma_{ж-г}$ - поверхностное натяжение на разделе жидкость-газ, н/м; θ - краевой угол смачивания, град.; V - объём пузырька, м³; q - ускорение силы тяжести, м/с²; ρ - плотность жидкости, кг/м³; R - радиус пузырька в его купольной части, м; h - высота пузырька, м.

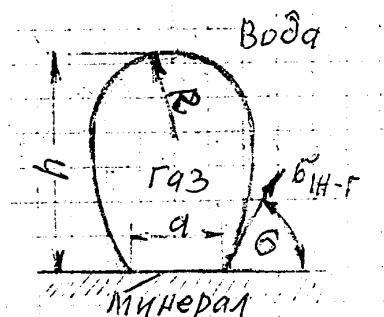


Рис. 1. Схема прилипания к твердой поверхности

$P_k = \frac{2\sigma_{ж-г}}{R}$ - капиллярное давление газа в пузырьке, дин/см². Оно на всех участках пузырька практически одинаково.

$P_r = hq\rho$ - гидростатическое давление воды у основания пузырька. Разница давлений $P_k - P_u$ внутри пузырька и вне его приводит к появлению добавочной силы отрыва F_r , равной произведению площади контакта $\frac{\pi a^2}{4}$ на величину добавочного давления $\frac{2\sigma_{ж-г}}{R} - hq\rho$,

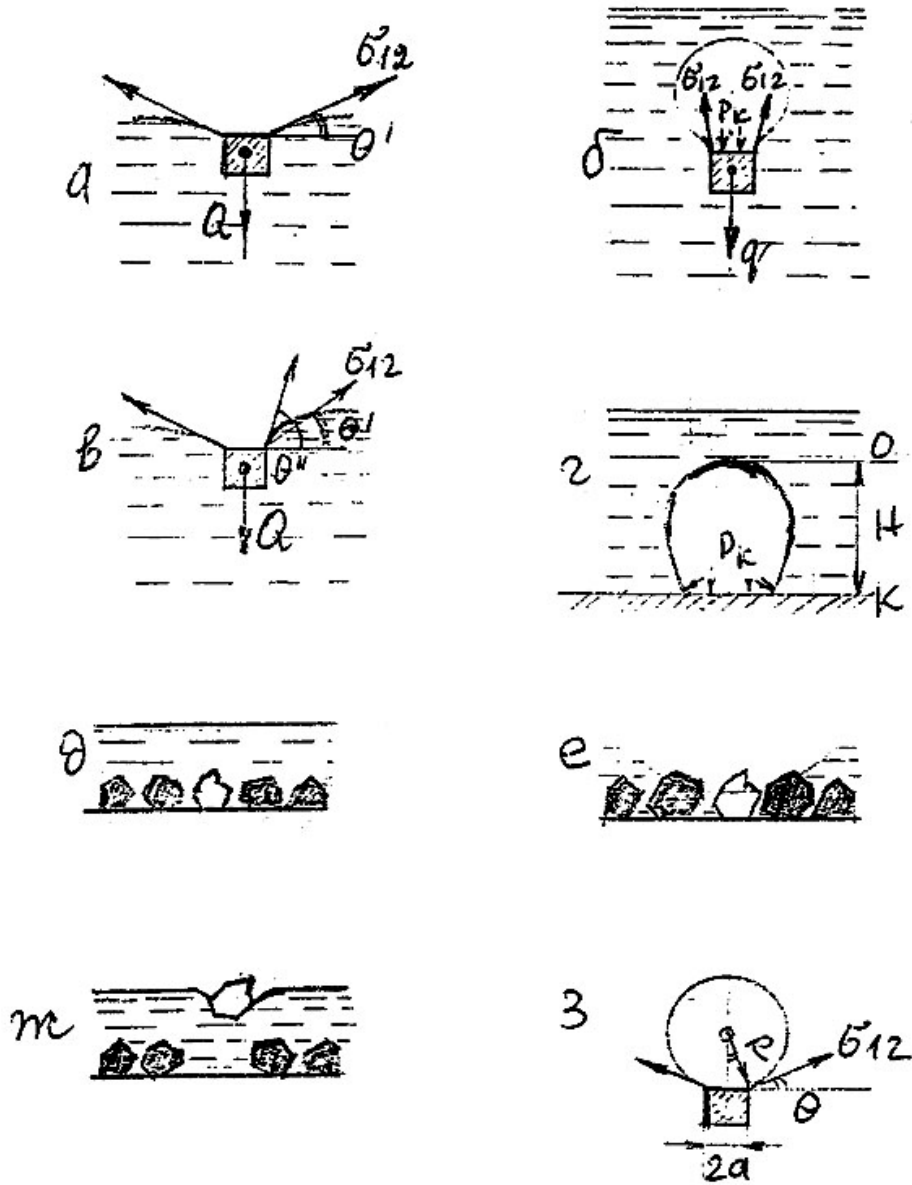
$$\text{т.е. } F_2 = \frac{\pi a^2}{4} \left(\frac{2\sigma_{ж-г}}{R} - hq\rho \right)$$

Сила прилипания пузырька $F = \pi a \sigma_{ж-г} \sin \theta$, с которой он удерживается поверхностью минерала, действует по периметру площади контакта пузырька и минерала, как бы притягивает твёрдую поверхность к оболочке пузырька.

Сила Архимеда пузырька $F_1 = Vq\rho$ - гидростатическая сила подъёма пузырька стремится оторвать пузырёк от твёрдой поверхности. Следовало бы F_1 уменьшить на вес воздуха в пузырьке.

Таким образом, уравнение Кабанова и Фрумкина, выражающее полное равновесие пузырька на твёрдой поверхности, предусматривает в качестве отрывающих усилий, кроме Архимедовой силы пузырька, добавочную силу отрыва, включающую капиллярное давление P_k , уменьшенное на величину гидростатического давления воды P_r у основания пузырька

Уравнением Кабанова и Фрумкина часто пользуются исследователи флотации, конкретно Мелик-Гайказян [2]. Мелик-Гайказян, рассматривая различие между плёночной и пенной флотацией, что в 3-м пункте, отмечает, что при плёночной флотации устойчивость закрепления частицы на поверхности воды, обусловлена трудноподвижностью трёхфазного периметра контакта, его эластичностью или гистерезисом краевого угла. Напротив, при пенной флотации закрепление частиц на пузырьках (а также пузырька на подложке) возможно при полном отсутствии явления гистерезиса смачивания [4]. Функции же гистерезиса смачивания, препятствующего наступлению жидкости на газовую фазу у периметра контакта пузырька, выполняет капиллярное давление P_k (рис. 2, з). На этом рисунке показан пузырёк, закреплённый на твёрдой поверхности в воде; у основания пузырька стрелками указано P_k , действующее на основание закрепления и боковые стенки пузырька у этого основания. Высота пузырька обозначена на H , причём вершина пузырька обозначена буквой O , а нижняя часть пузырька - K . Далее, он продолжает, что это наступление (т. е. жидкости на



[2] Рис. 2. Схемы поясняющие: явления пленочной флотации (а); пенной флотации (б); увеличение флотационной силы, обусловленной ростом гистерезисного угла от θ' до θ'' (в); действие капиллярного давления P_k , препятствующего сокращению периметра пузырька (г); явление пленочной флотации при пониженном уровне жидкости при флотогравитации (д-ж); вычисление угла θ при допущении о сферичности пузырька (з)

газ) становится возможным и пузырёк будет согнан с гидрофобной подложки только тогда, когда разность между ка-

пиллярными давлениями в пузырьке на уровне О и К станет меньше разницы гидростатических давлений между этими

уровнями, т.е. меньше величины $H\sigma q$, где H -высота пузырька, σ - разность между плотностями жидкости и газа, q - ускорение силы тяжести.

Подтверждением этому может служить то, что предельную величину H перед отрывом легко рассчитать по экспериментально проверенной формуле [7], для вывода которой представление о гистерезисе не потребовалось. Нас интересуют две величины в уравнении Кабанова и Фрумкина: величина капиллярного давления P_k и гидростатического давления $P_g = hq\rho$. Но прежде следует кратко обсудить вопрос о воздушных (газовых) пузырьках в жидкости (воде).

Пузырьки газа в жидкости образуются благодаря подвижности (текучести) жидкости, поверхностному натяжению и её искривленности.

Газовый пузырёк, образовавшийся в жидкости тем или иным путём в состоянии равновесия, это масса газа, ограниченная поверхностью вращения и стремящаяся под действием поверхностного натяжения принять сферическую форму. Так как газы формой не обладают, то они занимают определённый объём только при наличии внешнего сжимающего давления — со стороны стенок сосуда, в котором находится данная масса газа. Газы могут подвергаться только всестороннему (объёмному) сжатию или расширению [3, стр. 112]. Газы никогда не образуют свободной поверхности.

Так, пузырёк газа в жидкости - это сосуд, содержащий определённую массу газа. Так как пузырёк образуется в жидкости, то стенками его сосуда является оболочка жидкости, в которой он находится. Таким образом, пузырёк газа, смеси газов и паров, находящийся в жидкости, обладает оболочкой той жидкости, в которой он находится. Эта оболочка односторонняя, т.к. на границе

раздела газ-жидкость находится с внутренней стороны газ, а наружной границей является та же жидкость.

Система пузырёк газа - жидкость является гетерогенной системой. Признаком гетерогенности является наличие межфазной поверхности, поверхностного слоя.

Так как силы молекулярного взаимодействия молекул газа в поверхностном слое значительно меньше, чем межмолекулярное взаимодействие молекул жидкости в слое, то они обеспечивают наличие поверхностно-го слоя жидкости определённой толщины.

Обычно толщина поверхностного слоя жидкости составляет несколько молекул [4, стр. 19].

Пусть газовый пузырёк в жидкости находится в статическом равновесии. Давление, которое испытывает газ в пузырьке, складывается из атмосферного давления, гидростатического давления жидкости и капиллярного давления за минусом давления насыщенных паров жидкости.

Поэтому следовало бы Мелику-Гайказяну учитывать не только капиллярное давление P_k , но и эти давления.

Так как газ находится в пузырьке, являющимся для него сосудом с жидкой оболочкой, и он в нём сжат суммарным давлением и, находясь в статическом равновесии в жидкости он не меняет своей формы и объёма, то это суммарное давление газа компенсируется давлением оболочки на газ, и они уравновешиваются. Следовательно, капиллярное давление P_k не будет «давить» на площадку контакта при прилипании воздушного пузырька к твёрдой поверхности, что трактуют Кабанов и Фрумкин, а вслед за ними и Мелик - Гайказян, так как при этом капиллярное давление будет перераспределяться в пузырьке, уравновешиваясь противодействием

водной оболочки пузырька. Теперь о гидростатическом давлении у основания воздушного пузырька, прилипшего к твёрдой поверхности в воде $P_2 = hq\rho$.

Выражения $hq\rho$ не должно быть по двум причинам: 1. На пузырек, прилипший к твёрдой поверхности это гидростатическое давление не действует, потому что там его нет, так как остаточная водная прослойка, остающаяся между оболочкой пузырька и твёрдой поверхностью, по данным Дерягина, обладает свойствами, отличными от свойств воды в объёме, близкими твёрдому телу.

В элементарном учебнике физики под редакцией академика Г.С. Ландсберга (Т.1. М., Наука, 1972) в § 166, стр. 356 рассматриваются тела, лежащие на дне сосуда.

Дно стеклянного сосуда покрыто тонким слоем парафина. На него кладут кусок парафина с гладким основанием и осторожно наливают в сосуд воды. Парафин не всплывает на поверхность воды, хотя плотность

его меньше плотности воды. Слегка наклоняя сосуд, можно заставить его передвигаться по дну, но он не всплывёт.

Объяснение этого парадокса состоит в том, что вода не проникает между парафином и дном сосуда и, следовательно, на нижнюю поверхность парафина не действует гидростатическое давление.

2. Учитывать $hq\rho$ не следует и потому, что сила Архимеда пузырька обусловлена гидростатическим давлением. Так, нельзя же «само отнимать от себя». Если представить пузырёк кубиком со стороной h , тот его объём V будет равен площади основания, равной h^2 , умноженной на высоту h , т.е. равным $V=h^3$. Тогда сила Архимеда этого кубика в воде равна $F_1 = V(\rho_1 - \rho_2)q = h^3(\rho_1 - \rho_2)q$, где ρ_2 - плотность воздуха в кубике, (кг/м³).

Поэтому уравнением Кабанова и Фрумкина при исследованиях в теории флотации пользоваться не следует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабанов Б.Н., Фрумкин А.Н. Величина пузырьков, выделившихся при электролизе. - ЖФХ. Т. IV, вып. 5, 1933.
2. Мелик-Гайказян В.И. Сб. Современное состояние и перспективы развития теории флотации. Недостатки классических представлений теории флотации. Стр. 28-46. - М.: Наука, 1979.
3. Геворкян Р.Г., Шепель В.В. Курс общей физики, - М.: Высшая школа, 1972.
4. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. - М.: Химия, 1982. **ГИАЭ**

Коротко об авторах

Ячушко Э.П. – инженер.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 25 симпозиума «Неделя горняка-2007».
Рецензент д-р техн. наук, проф. А.А. Абрамов.