

## **Загальні питання технології збагачення**

5. Лабораторный стенд для исследования газификации углеродистых материалов / **И.В. Шульга, М.Г. Скляр, А.В. Васильев, и др.** // Кокс и химия. – 1999. – № 2. – С. 19-23.

6. Тютюнников Ю.Б., Шептовицкий М.С., Шульга И.В. Технологические схемы, расчет и моделирование промышленных процессов газификации угля. – Харьков: ХГЭУ, 1996. – 67 с.

7. Шульга И.В., Скляр М.Г., Миненко Е.В. и др. Моделирование процесса газификации твердого продукта термолиза малометаморфизованных углей. Определение оптимальных параметров процесса // Кокс и химия. – 1999. – № 6. – С. 8-12.

8. Использование отходов углеобогащения при обжиге цементного клинкера / **В.И. Бабушкин, В.И. Винниченко, И.В. Шульга и др.** // Кокс и химия. – 1997. – № 8. – С. 32-35.

9. Утилизация отходов при производстве цемента – экологический путь ликвидации терриконов и отвалов / **В.И. Бабушкин, А.И. Здоров, И.В. Шульга, и др.** // Цемент. – 1998. – № 2. – С. 27-28.

10. Бабушкин В.И., Винниченко В.И., Шульга И.В. Эффективность использования отходов углеобогащения при обжиге цементного клинкера // Наук. вісник будівництва. – 1998. – Вип. 2. – С. 128-130.

11. Бабушкин В.И., Винниченко В.И., Шульга И.В. Повышение эффективности использования отходов углеобогащения при обжиге цементного клинкера // Уголь Украины. – 1998. – № 4. – С. 48-49.

© Дроздник И.Д., Шульга И.В., 2010

*Надійшла до редколегії 18.04.2010 р.*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*

УДК 622.7

**П.И. ПИЛОВ**, д-р техн. наук,

**Н.М. ВЕРШИННА**

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

## **ВЯЗКОСТЬ РАЗБАВЛЕННЫХ СУСПЕНЗИЙ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Актуальность проблемы состоит в том, что современные обогатительные фабрики, используя в качестве рабочей среды воду, имеют замкнутые системы водооборота. Обратная вода, как правило, представляет собой разбавленные тонкодисперсные суспензии, твердая фаза которых представлена в основном глиной. Ее массовая концентрация, в зависимости от качества систем оборотного водоснабжения, может достигать нескольких десятков килограммов в кубическом метре. Обратная вода, по мере накопления в ней тонкодисперсной твердой фазы, приобретает повышенную вязкость [2], которая негативно влияет на точность сепарационных процессов, что приводит к повышенному взаимозасорению продуктов сепарации и снижению качества концентратов и повышению потерь полезного компонента в отходах. Особую важность эта проблема приобретает для Вольногорского горно-металлургического комбината, перерабатывающего россыпную титаноциркониевую руду, в которой содержится в

среднем около 20% глины [3]. Глина накапливается в оборотной воде в виде частиц крупностью 1-5 мкм, повышая ее вязкость в несколько раз по сравнению с вязкостью воды.

Для более глубокого понимания механизма повышения вязкости такой суспензии необходим детальный анализ уравнения "вязкость-концентрация", представленного в работе [1]. В ней в качестве объекта анализа выбран элементарный объем суспензии (рис. 1), который представляет собой куб с длиной ребра  $l$ , внутри которого у вершин находятся по  $1/8$  объема шара диаметром  $d$ .

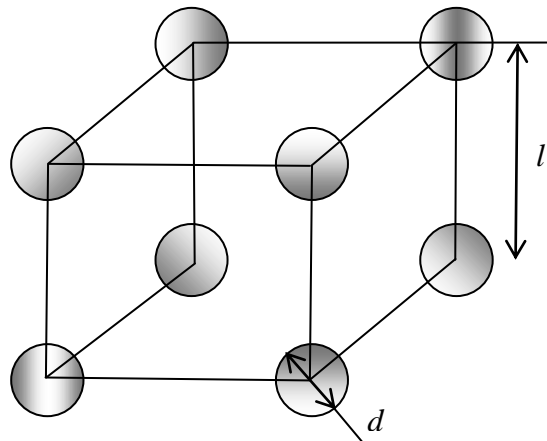


Рис. 1. Схематичное представление элементарного объема суспензии

Объем твердой фазы, заключенный в данном элементарном объеме суспензии, равен объему одной частицы, т.е.

$$V_m = \pi d^3 / 6,$$

где  $d$  – эквивалентный диаметр частицы твердой фазы.

Элементарный объем суспензии, исходя из его определения, равен

$$V_c = l^3.$$

Поскольку объемная концентрация твердой фазы составляет

$$c_V = V_m / V_c,$$

то межчастичное расстояние равно:

$$l = d \sqrt[3]{\frac{\pi}{6c_V}} = d \sqrt[3]{k_y / c_V},$$

где  $k_y$  – коэффициент упаковки твердой фазы, равный  $\pi/6$  лишь для кубической

## Загальні питання технології збагачення

упаковки. Для реальных суспензий этот коэффициент составляет 0,625.

Если нижний слой суспензии (рис. 2) движется со скоростью  $U_1$ , а верхний – со скоростью  $U_2$ , то его скорость относительно нижнего слоя будет  $\Delta U = U_2 - U_1$ . Градиент скорости дисперсионной среды в промежутках между слоями составит:

$$\frac{dU}{dy} = \frac{\Delta U}{l}.$$

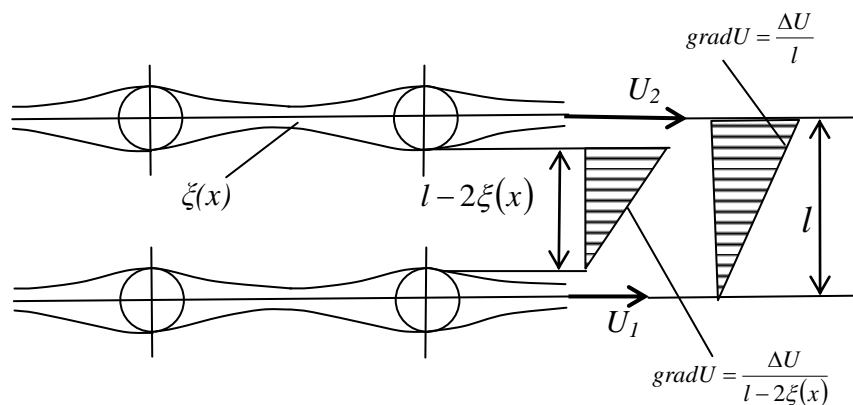


Рис. 2. К объяснению формирования локального градиента скорости

Такие же скорости  $U_1$  и  $U_2$  имеют и центры частиц, и их поверхности при отсутствии вращения последних.

Дисперсная фаза суспензий, в зависимости от ее физико-химических и поверхностных свойств, а также ионного состава дисперсионной среды и гидродинамического взаимодействия частиц и среды, связывает некоторое количество жидкости, образуя на поверхности частиц адсорбционные, сольватные и двойные электрические слои, неподвижные по отношению к частицам. Слой жидкости, связанный частицами в результате интегрального взаимодействия фаз и гидродинамического воздействия, является пограничным. Его толщина  $\lambda$  трудно поддается расчетам и измерениям. По некоторым данным она составляет 0,5-1 мкм и уменьшается при увеличении скорости обтекания частиц дисперсионной средой.

При сдвиговом течении суспензии происходит скольжение одного слоя жидкости с дисперсной средой относительно другого. Поверхность скольжения при этом отстоит на расстоянии  $\lambda$  от поверхности частиц. Линия тока скольжения, лежащая на этой поверхности, описывается функцией  $\xi(x)$  с началом координат на плоскости, в которой лежат центры частиц [1]. Тогда сдвиговое течение дисперсионной среды (жидкости) будет осуществляться в промежутке, ограниченном двумя поверхностями скольжения (рис. 2), что приведет к увеличению градиента скорости:

$$\frac{\partial U}{dy} = \frac{\Delta U}{l - 2\xi(x)}.$$

Из закона Ньютона следует, что сила сдвига слоев рассматриваемого элементарного объема суспензии  $T$  пропорциональна коэффициенту ее динамической вязкости  $\mu_c$ , градиенту скорости сдвига слоев  $dU/dy$  и площади их соприкосновения  $S = l^2$ :

$$T = \mu_c \frac{dU}{dy} S = \mu_c \frac{\Delta U}{l} l^2 = \mu_c \Delta U l.$$

Вязкость дисперсионной среды не меняется при нахождении в ней нерастворимой твердой фазы, поэтому повышенная вязкость суспензий проявляется как кажущаяся, обусловленная увеличением силы сдвига из-за возрастания локального градиента скорости в межчастичных промежутках [1]:

$$T = \mu \int_S \frac{\partial U}{\partial y} dS = \mu \int_S \frac{\Delta U}{l - 2\xi(x)} dS.$$

Приравнявая вышеприведенные уравнения, получаем коэффициент динамической вязкости суспензии с монодисперсной твердой фазой:

$$\mu_c = \mu \frac{1}{l^2} \int_S \frac{dS}{1 - 2\xi(x)/l}. \quad (1)$$

Для реальных концентрированных суспензий, которые используются при обогащении полезных ископаемых, характерно выравнивание поверхности скольжения слоев и превращения ее в плоскость, отстоящую на величину  $\lambda$  от частиц. Это происходит из-за уменьшения межчастичных промежутков и выравнивания линий тока вследствие создания гидродинамической тени соседними частицами. В таком случае  $\xi(x) = r + \lambda$ , где  $r$  – радиус частиц. Поэтому в работе [1] и предложена следующая формула для коэффициента динамической вязкости суспензии:

$$\mu_c = \frac{\mu}{1 - \sqrt[3]{c_v(1 + \lambda s)/k_y}}. \quad (2)$$

Многочисленная проверка этой формулы, в том числе и для глинистых суспензий, к которым относится оборотная вода обогатительной фабрики Вольногорского горно-металлургического комбината [2], показала ее пригодность для широкого диапазона изменения концентрации твердой фазы. Однако в области малых концентраций (менее 0,02) наблюдается отклонение расчетных и изме-

## Загальні питання технології збагачення

рених величин относительной вязкости до 10% отн.

Это отклонение может быть объяснено принятым в работе [1] допущением, корректным для концентрированных суспензий.

Для разбавленных суспензий, к которым относится оборотная вода обогатительных фабрик, из-за большого межчастичного расстояния сглаживания линий тока не происходит. Поэтому необходимо отыскать более точное решение уравнения (1).

Ввиду сложности отыскания аналитического решения уравнения (1) прибегнем к осреднению функции линий тока и представим названное уравнение в виде:

$$\mu_c = \mu \frac{1}{l^2} \int_s \frac{dS}{1 - 2\xi(x)/l} = \frac{\mu}{1 - 2\bar{\xi}/l}. \quad (3)$$

Для отыскания осредненного значения функции линии тока  $\bar{\xi}$  рассмотрим механизм обтекания частицы твердой фазы в пределах элементарного объема суспензии (рис. 3). Для этого введем относительные координаты с началом в центре твердой частицы. При этом истинное значение линейного размера отнесено к радиусу частицы  $R_0$ .  $x = r/R_0$ .

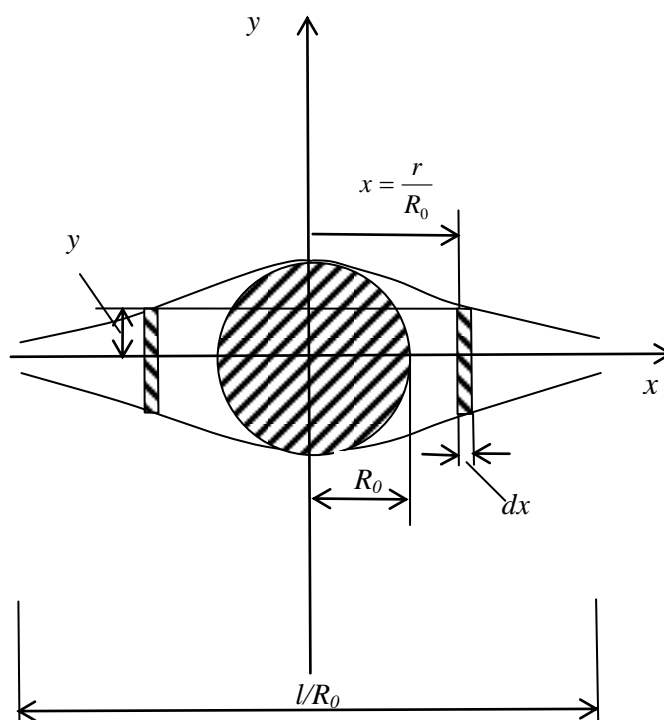


Рис. 3. К определению осредненного значения функции линий тока

Осредненное значение функции линии тока можно определить исходя из объема, заключенного под линией тока, и плоскостью, проходящей через центр частицы в пределах элементарного объема суспензии.

Уравнение линии тока, исходя из закономерности распределения случай-

ной величини, примем в виде экспоненты с аргументом в ее показателе во второй степени, т.е.:

$$y(x) = \exp(-kx^2). \quad (4)$$

Тогда, в соответствии с рис. 3, приращение указанного выше объема при изменении координаты на  $dx$ , составит:

$$dV = y(x)2\pi x dx. \quad (5)$$

Определение объема осуществляется путем интегрирования уравнения (5) в пределах изменения аргумента  $x$  от нуля (начало координат – центр частицы) до границы элементарного объема  $x_m = l/d = \sqrt[3]{k_y/c_v}$ .

Таким образом, из решения уравнения (5) следует:

$$V = \int_0^{x_m} \exp(-kx^2) 2\pi x dx = \frac{\pi}{k} [1 - \exp(-kx_m^2)]. \quad (6)$$

С другой стороны, используя понятие осредненного значения функции тока, запишем для того же объема следующее выражение:

$$V = \pi x_{x_m}^2 \bar{\xi} \quad (7)$$

Из равенства объемов, определяемых уравнениями (6) и (7) следует:

$$\bar{\xi} = \frac{V}{\pi x_{x_m}^2} = \frac{\pi}{\pi k x_{x_m}^2} [1 - \exp(-kx_m^2)] = \frac{1 - \exp(-kx_m^2)}{kx_{x_m}^2}$$

С учетом того, что  $2R_0 = d$ , то решение уравнения (1) примет вид:

$$\mu_c = \mu \frac{1}{l^2} \int_S \frac{dS}{1 - 2\xi(x)/l} = \mu \frac{S}{l^2 (1 - 2\bar{\xi}/l)} = \frac{\mu}{1 - \frac{d}{l} \cdot \frac{1 - \exp(-kx_m^2)}{kx_m^2}},$$

Вводя понятие параметра сглаживания линий тока:

$$\omega = \frac{1 - \exp(-k(k_y/c_v)^{2/3})}{k(k_y/c_v)^{2/3}}, \quad (8)$$

получаем уточненное выражение для коэффициента динамической вязкости суспензий:

$$\mu_c = \frac{\mu}{1 - \omega \sqrt{c_v(1 + \lambda s)}/k_y} \quad (9)$$

Величина параметра сглаживания линий тока имеет большое значение для вязкости суспензии. В зависимости от объемной концентрации твердой фазы ее значение меняется от нуля (при  $c_v = 0$ ) до единицы при увеличении  $c_v$ . При этом линии тока сглаживаются, а формула (9) трансформируется в формулу (2).

Кроме объемной концентрации твердой фазы на характер сглаживания линий тока влияет и величина градиента сдвигового течения суспензии. Это влияние проявляется через значение коэффициента  $k$  в показателе экспоненты уравнения (4). Увеличение градиента скорости сдвигового течения приводит к росту коэффициента и к снижению вязкости суспензии при неизменной величине объемной концентрации твердой фазы.

Проверка полученного уравнения (9) производилась путем сопоставления расчетных и измеренных значений вязкости глинистой суспензии при малых (до 0,04) значениях концентрации твердой фазы. Измерение вязкости суспензии производилось методом истечения через капилляр диаметром 3 мм определенного объема суспензии. При этом измерялось время истечения и сопоставлялось со временем истечения эталонной жидкости (в данном случае – воды). Результаты измерения приведены в таблице и на графике (рис. 4). Здесь для каждого значения объемной концентрации твердой фазы даны по три величины относительной вязкости, полученные в результате измерений.

Результаты измерения относительной вязкости глинистой суспензии  $\mu'$  при различной объемной концентрации твердой фазы  $c_v$

$c_v$	$\mu'$	$\mu'$	$\mu'$	$\bar{\mu}'$
0	1	1	1	1
0,0021	1,2453	1,1511	1,1975	1,1980
0,0041	1,2591	1,2311	1,2355	1,2419
0,0062	1,3198	1,3155	1,2989	1,3114
0,0082	1,3261	1,3410	1,3249	1,3306
0,0102	1,3320	1,3433	1,3365	1,3373
0,0122	1,3428	1,3593	1,3520	1,3514
0,0145	1,3748	1,3936	1,3597	1,3761
0,0165	1,3887	1,4457	1,3712	1,4019
0,0185	1,3975	1,4532	1,4456	1,4321
0,0204	1,4268	1,5553	1,5406	1,5076
0,0224	1,4415	1,6268	1,5649	1,5444
0,0245	1,5037	1,6707	1,7288	1,6344
0,0264	1,5583	1,7202	1,7564	1,6783
0,0285	1,6095	1,7551	1,7704	1,7116
0,0305	1,7089	1,8531	1,8063	1,7894
0,0327	1,7415	1,9218	1,8538	1,8390
0,0345	1,8442	1,9783	1,9317	1,9181
0,0366	1,8530	1,9865	2,0278	1,9558
0,0383	2,0100	2,0511	2,0297	2,0303
0,0401	2,1731	2,1718	2,1111	2,1520

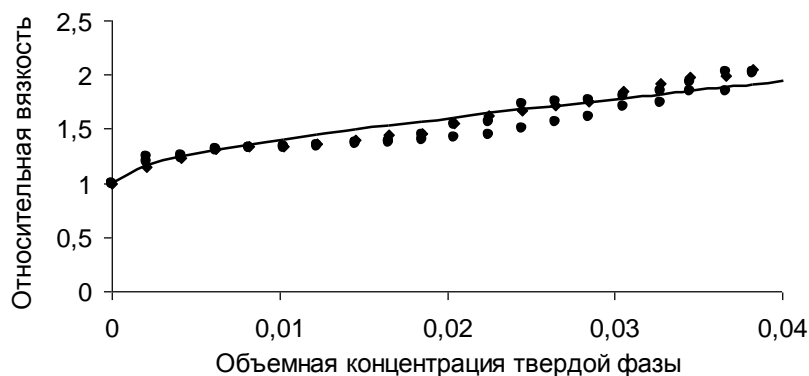


Рис. 4. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений вязкости глинистой суспензии

На рис. 4 сплошной линией обозначена теоретическая зависимость, рассчитанная по формуле (9) при значениях  $\lambda_s = 1,04$  и  $k = 0,015$ . Точками представлены экспериментальные данные из таблицы, приведенной выше. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений показало, что расхождение в среднем не превышает 2% отн.

Таким образом, полученная формула может быть использована для анализа влияния факторов, определяющих вязкость разбавленных суспензий, к которым относятся объемная концентрация и дисперсность твердой фазы, ее поверхностные свойства, характер сдвигового течения. В результате такого анализа могут быть выявлены способы управления реологическими свойствами оборотной воды обогатительных фабрик для повышения эффективности сепарационных процессов.

### Список литературы

1. **Пилов П.И.** Уравнение "вязкость-концентрация" для полидисперсных суспензий / Обогащение полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1991. – Вып. 41. – С. 79-87.
2. **Пилов П.И.** Влияние реологических свойств оборотной воды на сепарационные процессы // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2008. – Вип. 32(73). – С. 133-139.
3. **Пилов П.И., Вершинина Н.М., Краснопер В.П.** Влияние качества оборотной воды на показатели обогащения титано-циркониевой руды // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 36(77)-37(78). – С. 192-196.

© Пилов П.И., Вершинина Н.М., 2010

*Надійшла до редколегії 20.02.2010 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*