

Приведенное уравнение регрессии (1) хорошо описывает зависимость  $E = f(t)$  во всем исследуемом диапазоне зольности исходного угольного шлама. Статистическая значимость полученных результатов также подтверждается высокими значениями коэффициентов детерминации моделей  $R$ , а также низкими значениями стандартной ошибки их оценки  $S$ . Уравнение регрессии – адекватно изучаемой кинетической зависимости при любых расходах флокулянта.

#### *Выводы*

1. При селективной флокуляции углей латексами кинетические кривые флокулообразования  $d_{фл} = f(t)$  в случае расхода латекса до 100 г/т описывается сигмоидальными уравнениями регрессии. При расходах латекса более 100 г/т отмеченная зависимость имеет характер полинома третьей степени.

2. Кинетическая зависимость извлечения угольных фракций в концентрат  $E = f(t)$  изменяет характер от экстремальной при низкой до убывающей при высокой зольности угля. В обоих случаях она эффективно описывается полиномом второй степени с логарифмической функцией.

3. Рациональное время флокуляции лежит в пределах 30–80 с. Для низкозольных углей этот предел составляет 60–80 с, высокозольных – 30–40 с.

#### Список литературы

1. Нікітін І.М., Сергєєв П.В., Білецький В.С. Селективна флокуляція вугільних шламів латексами. – Донецьк: ДонДТУ, "Східний видавничий дім", 2001. – 152 с.
2. Сергєєв П.В., Білецький В.С. Селективна флокуляція вугілля. – Донецьк: ДонДТУ, – 1999. – 136 с.
3. Никитин И.Н. Разработка флокуляционно-флотационного способа обогащения угольных шламов с применением латексного флокулянта. – Автореф. дис. канд. техн. наук. – Люберцы: ИОТТ, 1986. – 16 с.
4. Залевський В.І. Селективна флокуляція вугільних шламів синтетичними латексами. – Автореф. дис. канд. техн. наук. – Дніпропетровськ: ДНГА, 2001. – 20 с.
5. Исследование процесса селективной коагуляции угольных шламов: Отчет о НИР /ДГИ, № ГР 76016361. – Днепропетровск, 1977. – 89 с.
6. Сергєєв П.В., Залевский В.И. Исследование кинетики флокулообразования при селективной агрегации углей латексами / Сб. науч. тр. ДонГТУ. – Донецк: ДонГТУ, 1996. – С. 56–58.

© Сергєєв П.В., Залевский В.И., 2005

*Надійшла до редколегії 03.11.2005 р.  
Рекомендовано до публікації к.т.н. Ю.Л. Папушиним*

УДК 622.794

**Е.И. НАЗИМКО**, д-р техн. наук,

53

**Збагачення корисних копалин, 2005. – Вип. 24(65)**

**И.Н. ДРУЦ, Л.И. СЕРАФИМОВА,  
Н.А. ЗВЯГИНЦЕВА, Ю.В. ШЕВЧЕНКО**

(Украина, Донецк, Донецкий национальный технический университет)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ ПЕН, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ВСПЕНИВАТЕЛЕЙ**

Исследования, которые выполняются в настоящее время отечественными и зарубежными исследователями, направлены на поиск и разработку новых способов обогащения тонких классов углей и шламов, включая нетрадиционные способы применительно к угольному сырью, а также на совершенствование уже известных.

В промышленной практике многие предприятия стремятся уйти от использования флотации и ограничить или вообще исключить применение дорогостоящей термической сушки. Но такое положение в промышленности не означает, что процесс флотации должен выпасть из поля зрения исследователей. Именно флотационный метод – наиболее производительный в обогащении угольной мелочи, особенно для углей, используемых при коксовании. Кроме того, флотация широко применяется при обогащении многих руд. Тем не менее до настоящего времени остаются вопросы, требующие уточнения и дополнения.

В частности, довольно сложно исследовать процессы, происходящие на микроуровне, например, взаимодействия трех фаз во время их столкновения и образования флотационного комплекса, изменения этого комплекса при его перемещении в камере машины и всплывании в пенный слой. При образовании флотационного комплекса происходит механическое и физико-химическое взаимодействие поверхностей контактирующих фаз, зависящее от их состояния, которое определяется различными параметрами.

Одной из фаз является воздушный пузырек с поверхностью, покрытой слоем адсорбированных молекул вспенивателя. Эта поверхность обладает определенными механическими свойствами. Кроме того, на процесс флотации существенное влияние оказывают структурно-механические свойства пен, к которым в первую очередь следует отнести плотность, упругость и вязкость [1, 2].

Исследования с применением компьютерного моделирования позволили установить, что при столкновении воздушного пузырька и минеральной частицы тангенциальная компонента скорости частицы возрастает с увеличением эксцентриситета между центром пузырька и точкой встречи с частицей [3, 4]. Именно эта компонента скорости при увеличении до критического значения вызывает проскальзывание частицы относительно поверхности пузырька и в итоге ее отрыв. Снижение скорости скользящей

частицы по поверхности адсорбционного слоя воздушного пузырька в основном обеспечивается за счет вязкости этого слоя, так как вязкость или внутреннее трение является свойством текучих тел оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой.

Исследовать свойства поверхности единичного пузырька довольно сложно, поэтому можно связывать их со свойствами двухфазных пен как образования структуры из значительного количества воздушных пузырьков в растворе вспенивателя [1].

Цель данной статьи – исследование вязкости пен, получаемых при использовании различных реагентов-вспенивателей.

Общую вязкость пленки пены можно рассматривать как сумму вязкостей двух ее адсорбционных слоев  $\eta_{ac}$  и средней части пленки  $\eta_{cp}$  [5]:

$$\eta = \eta_{ac} + \eta_{cp} .$$

При условии, что вязкость средней части пленки невелика, ее значением можно пренебречь. Тогда вязкость пленки пены будет примерно равняться удвоенной вязкости адсорбционных слоев, что практически имеет место в растворах мыл и синтетических поверхностно-активных веществ. В ряде случаев вязкость средней части пленки может быть соизмеримой или превышать вязкость адсорбционных слоев. При этом общая вязкость пленки пены увеличивается.

Одной из наиболее важных причин увеличения стабильности пленок с повышенной вязкостью объемной ее части следует считать замедление стока междупленочной жидкости.

При образовании адсорбционного слоя одновременно с компонентами, обладающими высокой поверхностной активностью, на поверхности воздушных пузырьков могут также адсорбироваться и менее активные компоненты. Переход поверхностно-активных компонентов в среднюю часть пленки обусловлен особенностями ее образования, способствующими непрерывному обновлению поверхности и обмену поверхностно-активными компонентами. В результате этих процессов в средней части пленки между адсорбционными слоями может образоваться пространственная структура, существенно повышающая вязкость этой части пленки. Наличие объемной структуры в пленках значительно повышает устойчивость пен в целом.

Процесс стабилизации в этом случае происходит благодаря снижению скорости вытекания жидкости и скорости утончения пленки. Замедление вытекания может быть следствием как более медленного течения жидкости в тонких капиллярах, так и результатом обратного всасывания жидкости в капилляры, открывающиеся по мере вытекания жидкости.

Вязкость всей пленки может определяться высокой вязкостью

адсорбционных слоев вследствие преимущественной адсорбции более активных молекул.

Гидратация полярных групп молекулы поверхностно-активных веществ играет важную роль, поскольку препятствует движению жидкости под действием капиллярных сил и силы тяжести. Такие гидратированные молекулы способствуют образованию поверхностных слоев, увеличивающих стабильность пузырьков. Ряд авторов допускают также возможность и гидратации части углеводородной цепи, особенно молекул, занимающих в поверхностном слое большую площадь [1, 2, 5]. С учетом этих представлений основными факторами стабилизации пен может быть наличие сил сцепления между отдельными молекулами адсорбционного слоя и подвижность этих молекул, обеспечивающую быстрое восстановление деформаций, возникающих при истечении жидкости из пузырьков.

Ориентированное расположение молекул поверхностно-активных веществ и связанных с ними сольватных оболочек сообщает твердообразные свойства системе прослоек пены. Эти прослойки образуют квазикристаллический каркас, несущий заполненные газом ячейки и придающий системе механическую прочность [6].

Наличие в двухфазных пенах тонкодисперсных воздушных пузырьков и сольватных слоев жидкости способствует сложному характеру сопротивления внутреннего трения при деформации такой гетерогенной системы. Благодаря объемной структуре в пленках значительно повышается устойчивость пен: они проявляют упругие свойства и повышенную вязкость. Существование такой структуры подтверждено исследованиями неводных пен с помощью электронной микроскопии [7].

На параметры структурно-механических свойств пены существенно влияют поверхностно-активные вещества. Исследование вязкости двухфазных пен, полученных из растворов смеси спиртов С6-С7, а также применяемых в практике углеобогащения вспенивателей Т-66 и Т-80, выполнялось с использованием методики, приведенной в работе [8]. Отличие – в расположении лопасти параллельно направлению ее отведения, что позволяет определять не только вязкость, но и сопротивление сдвигу.

Исходной информацией для определения вязкости служат виброграммы затухающих колебаний, представленные на рис. 1. Предварительное тарирование установки выполнено на воде, имеющей температуру 18° С, вязкость которой известна. Все эксперименты дублировались несколько раз, затем находились средние значения перемещений.

Движение колебательной системы описывается уравнением второго порядка

$$d^2x / dt^2 + 2\varphi dx / dt + p^2 x = 0, \quad (1)$$

где  $x$  – перемещение груза;  $\varphi$  – декремент колебаний;  $p$  – собственная частота незатухающих колебаний.

Решение уравнения (1) имеет следующий вид:

$$x = A_0 \sin ( p_d + \beta ) e^{-\varphi t}, \quad (2)$$

где  $A_0$  – начальное смещение;  $p_d$  – собственная частота затухающих колебаний;  $\beta$  – сдвиг фаз.

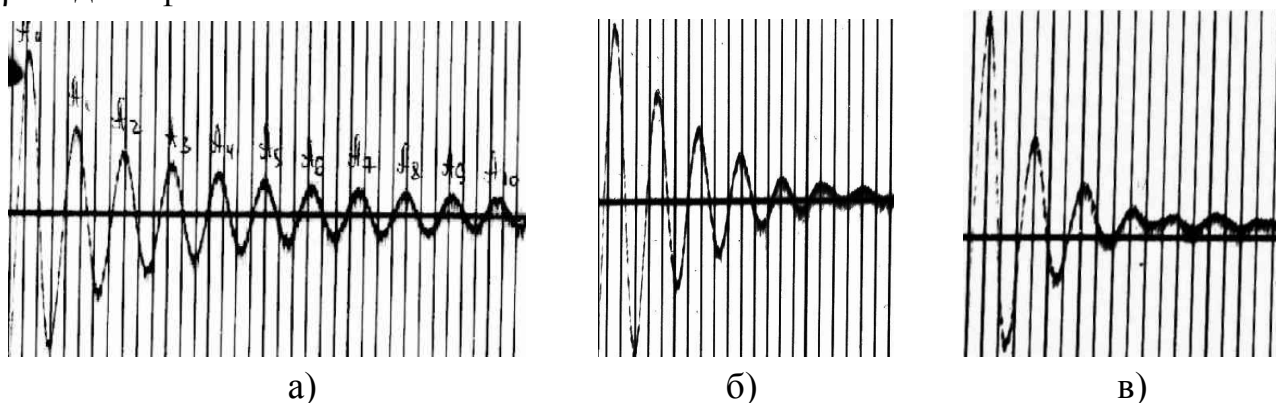


Рис. 1. Виброграммы затухающих колебаний измерительного элемента для воды (а) и двухфазных пен, образованных из растворов вспенивателей: спиртов С<sub>6</sub>-С<sub>7</sub> (б) и Т-66 (в) при концентрации 6 мг/дм<sup>3</sup>

В связи с тем, что величина  $\beta$  зависит от начала отсчета, выбираемого произвольно, то значение  $\beta$  можно принять равным  $0,5\pi$ . Тогда уравнение (2) приводится к виду:

$$x = e^{-\varphi t} A_0 \sin p_d .$$

Кроме того, приближенно можно считать, что декремент колебаний пропорционален динамической вязкости двухфазной пены и может быть определен из выражения

$$\varphi = k \eta ,$$

где  $k$  – постоянная измерительного прибора, м<sup>2</sup>/(н с);  $\eta$  – вязкость исследуемой среды, н с/м<sup>2</sup>.

Обработка экспериментальных виброграмм позволила получить регрессионные зависимости амплитуды колебаний от времени, на базе которых определена вязкость двухфазной пены. Некоторые примеры экспериментальных и регрессионных зависимостей представлены на рис. 2

(пунктиром).

Коэффициент корреляции имеет высокие значения и колеблется в пределах 0,94–0,998.

В таблице приведены данные для определения вязкости двухфазных пен при использовании различных поверхностно-активных веществ.

На рис. 3 показана зависимость вязкости от концентрации реагентов-вспенивателей и ее статистическая оценка (как пример – для спиртов).

Константа прибора определена с учетом вязкости воды, имеющей температуру 18° С, и составила величину – 0,5741 м<sup>2</sup>/нс.

Выполненные экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что при увеличении концентрации раствора реагента-вспенивателя от 3 до 18 мг/дм<sup>3</sup>, что соответствует его расходу 50–300 г/т соответственно, вязкость двухфазных пен растет от значения  $2,56 \times 10^{-3}$  для спиртов С<sub>6</sub>-С<sub>7</sub> до величины  $7,7 \times 10^{-3}$  нс/м<sup>2</sup> для Т-66.

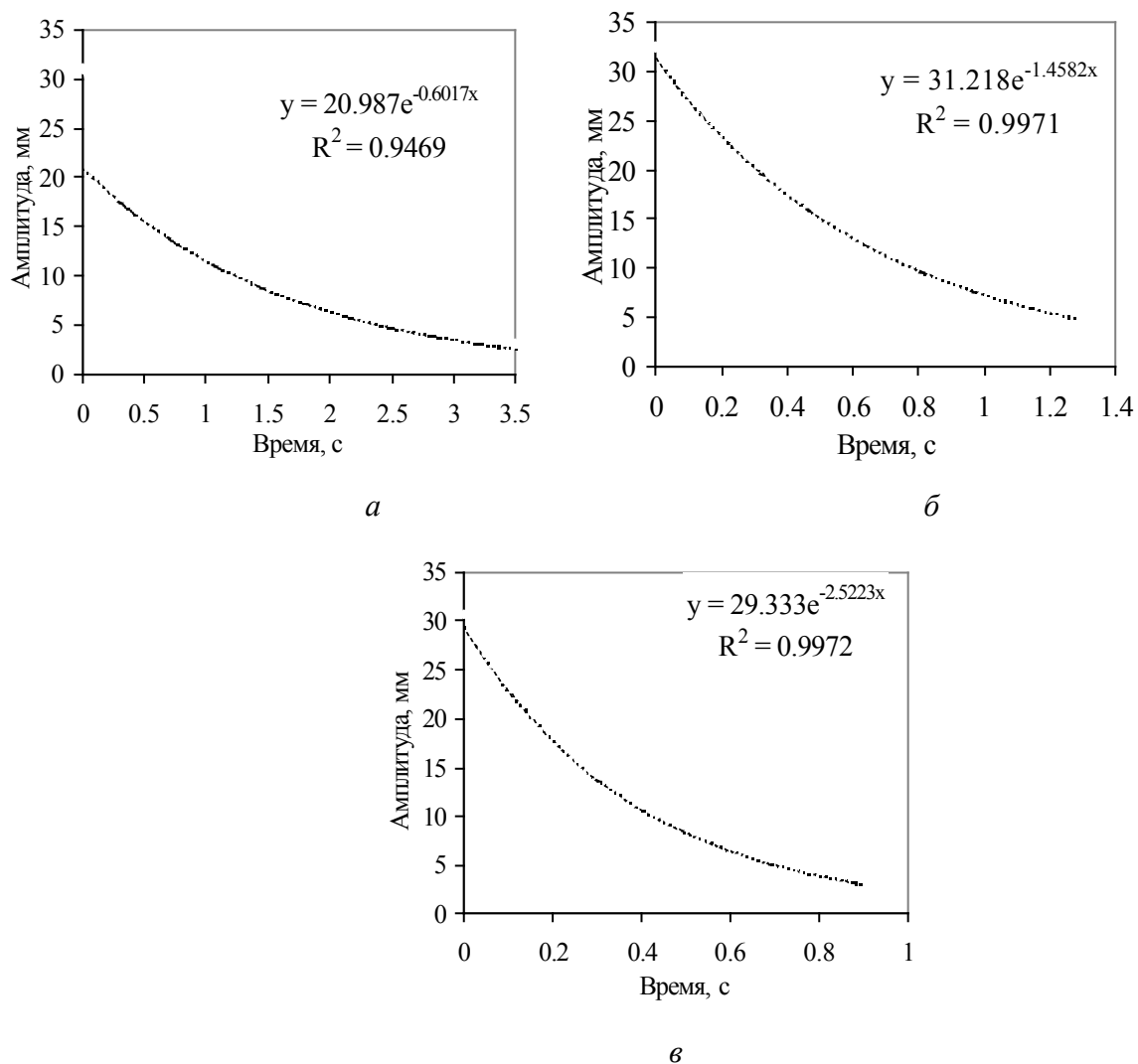


Рис. 2. Экспериментальные зависимости амплитуды затухающих колебаний от времени и регрессионные уравнения для них: а – вода, б – спирты C<sub>6</sub>-C<sub>7</sub>, в – Т-66

Рис. 2. Экспериментальные зависимости амплитуды затухающих колебаний от времени и регрессионные уравнения для них:  
а – вода, б – спирты C<sub>6</sub>-C<sub>7</sub>, в – Т-66

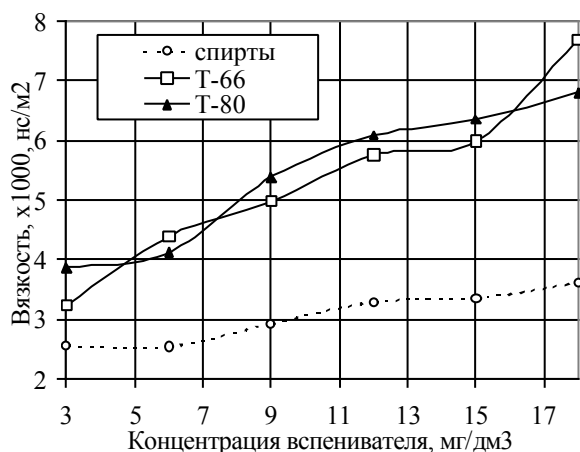
Декремент колебаний и вязкость пен из растворов исследованных вспенивателей

Концентрация, мг/дм <sup>3</sup>	Расход, г/т	Декремент колебаний для вспенивателей		
		спирты C <sub>6</sub> -C <sub>7</sub>	Т-66	Т-80
3	50	-1,4724	-1,8565	-2,2218
6	100	-1,4582	-2,5223	-2,3596
9	150	-1,678	-2,8606	-3,0888
12	200	-1,8856	-3,3069	-3,4907

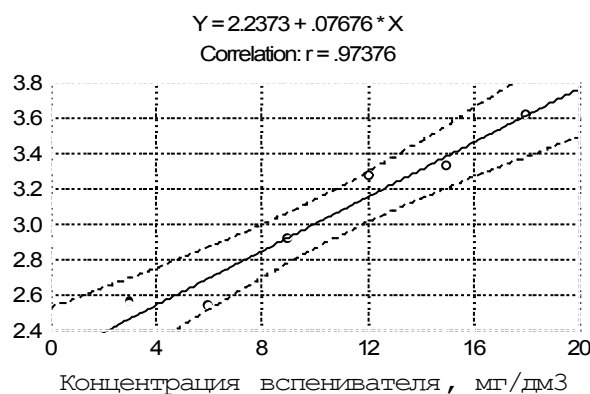
15	250	-1,9191	-3,4352	-3,6457
18	300	-2,0813	-4,4175	-3,9040

Наиболее низкой вязкостью обладают пены, образованные из растворов спиртов С<sub>6</sub>-С<sub>7</sub>. Реагенты-вспениватели Т-66 и Т-80 имеют довольно близкие значения вязкости для образованных из их растворов двухфазных пен.

В диапазоне рабочих концентраций растворов, применяемых в промышленности (50–150 г/т), вязкость двухфазных пен колеблется в пределах  $3,23\text{--}5,38 \times 10^{-3}$  нс/м<sup>2</sup> для наиболее широко используемых вспенивателей Т-66 и Т-80, что в 3–5 раз превышает вязкость воды.



а



б

Рис. 3. Зависимость вязкости от концентрации раствора вспенивателя (а) и ее статистическая оценка (б) при уровне значимости 0,95

Рис. 3. Зависимость вязкости от концентрации раствора вспенивателя (а) и ее статистическая оценка (б) при уровне значимости 0,95

Экспериментальные исследования одной из важных структурно-механических характеристик двухфазных пен — их вязкости или внутреннего трения — позволили определить реагенты с наиболее высокой вязкостью, которыми являются поверхностно-активные вещества Т-66 и Т-80.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение такой структурно-механической характеристики, как плотность пены. Другие важные параметры, определяющие свойства двухфазных пен, имеющих значение для образования флотационного комплекса "минеральная частица — пузырек воздуха" как элементарного акта флотационного обогащения — их дисперсность, скорость коалесценции пузырьков, обводненность, время и скорость разрушения.



## Список літератури

1. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. – М.: Химия, 1975. – 264 с.
2. Зонтаг Г., Штрэнге К. Коагуляция и устойчивость дисперсных систем. – Л.: Химия, 1973. – 150 с.
3. Е.И. Назимко, И.Н. Друц. Исследование кинетики взаимодействия фаз в динамической среде при обогащении минералов // Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ. – 2004. – №1. – С. 336–339.
4. Е.И. Назимко, И.Н. Друц. Исследование кинетики взаимодействия мелких частиц с пузырьками воздуха в процессе флотации // Обогащение полезных ископаемых. Днепропетровск. – 2003. – Вып. 18(59). – С. 95–102.
5. К.В. Зотова, А.А. Трапезников. Исследования двухсторонних пленок, образованных из аэрозоля МА с добавками желатины // Коллоидный журнал. Т. 27. – 1965. – №2. – С. 197–202.
6. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. – М-Л.: Химия, 1974. – 352 с.
7. О.Г. Тараканов, А.И. Демина, Е.Г. Дубяга. О структурообразовании в пленках неводных пен как факторе их стабилизации // Докл. АН СССР. – 1965. – Т.163, №3. – С. 684–685.
8. Н.В. Сухин, Е.И. Зозуля. Экспериментальное исследование вязкости двухфазных пен // Обогащение полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1978. – Вып. 23. – С. 67–71.

© Назимко Е.И., Друц И.Н., Серафимова Л.И.,  
Звягинцева Н.А., Шевченко Ю.В., 2005

*Надійшла до редколегії 10.10.2005 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. Піловим П.І.*

УДК 622.77

**В.И. КРИВОЩЕКОВ**, канд. техн. наук,

**О.А. ЕРМАК**

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

## К СТРУКТУРЕ ПОТОКА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ЩЕЛЕВОМ КАНАЛЕ

Развитие флотационной технологии углей, рудного и нерудного минерального сырья в основном зависит от совершенствования процессов флотации и удаления пенного продукта из камеры флотомашин.

Для удаления минерализованной пены известно много конструкций гребков [1].

По мнению авторов [2] повысить качество угольного флотоконцентрата