

УДК 622.763

Е.И. НАЗИМКО, д-р техн. наук, проф.,

И.Н. ДРУЦ, Л.И. СЕРАФИМОВА, инж.,

Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ ПЕН, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ВСПЕНИВАТЕЛЕЙ

Приведены данные исследования вязкости двухфазных пен как структуры из значительного количества воздушных пузырьков в растворе вспенивателя.

Исследования, которые выполняются в настоящее время отечественными и зарубежными учеными, 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 является наиболее производительным процессом для обогащения угольной мелочи, особенно для углей, используемых для коксования. Кроме того, флотация имеет широкое использование 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 в процессе 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 и диполей воды. 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, проведенные 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 обеспечивается в основном за счет вязкости этого слоя, так как вязкость или внутреннее трение является свойством текучих тел оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой.

Исследование свойств поверхности единичного пузырька является довольно сложным, поэтому можно связывать их со свойствами двухфазных пен как структурированного образования из значительного количества воздушных пузырьков в растворе вспенивателя [1].

Целью данной статьи является 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]:

$$\eta = \eta_{ac} + \eta_{cp} . \quad (1)$$

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 является замедление стока междупленочной жидкости.

При образовании адсорбционного слоя одновременно с компонентами, обладающими высокой поверхностной активностью, на поверхности воздушных пузырьков также могут 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, т.к. она препятствует движению жидкости под действием капиллярных сил и силы тяжести. Такие гидратированные молекулы

способствуют образованию поверхностных слоев, увеличивающих стабильность пузырьков. Ряд авторов допускают возможность также 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, а также 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 существенное влияние оказывают 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]. Отличием является расположение лопасти параллельно направлению ее отведения, что позволяет определять не только вязкость, но и сопротивление сдвигу.

Исходной информацией для определения вязкости являются виброграммы затухающих колебаний, представленные на рис. 1. Предварительное тарирование установки выполнено на воде, имеющей температуру 18<sup>0</sup>, вязкость которой известна. Все эксперименты дублировались несколько раз, затем находились средние значения перемещений.

Движение колебательной системы описывается уравнением второго порядка:

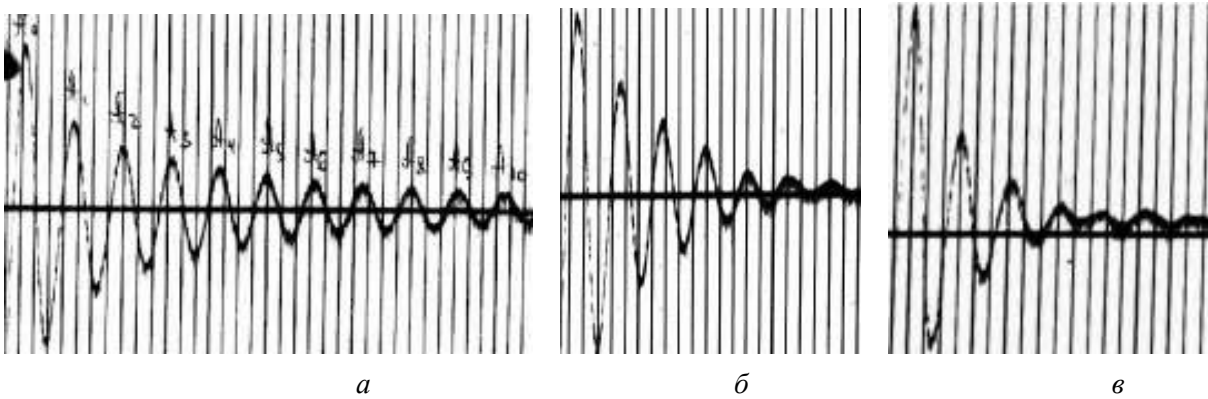
$$d^2x / dt^2 + 2\varphi dx/dt + p^2x = 0 , \quad (2)$$

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

Решение уравнения (2) имеет следующий вид:

$$x = A_0 \text{Sin} (p_d + \beta) e^{-\varphi t} , \quad (3)$$

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 можно принять значение  $\beta$  равным  $0.5\pi$ . Тогда уравнение (3) приводится к виду:

$$x = e^{-\varphi t} A_0 \sin p_d t . \quad (4)$$

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

$$\varphi = \kappa \eta , \quad (5)$$

где  $\kappa$  – 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 (показаны пунктиром) представлены на рис. 2.

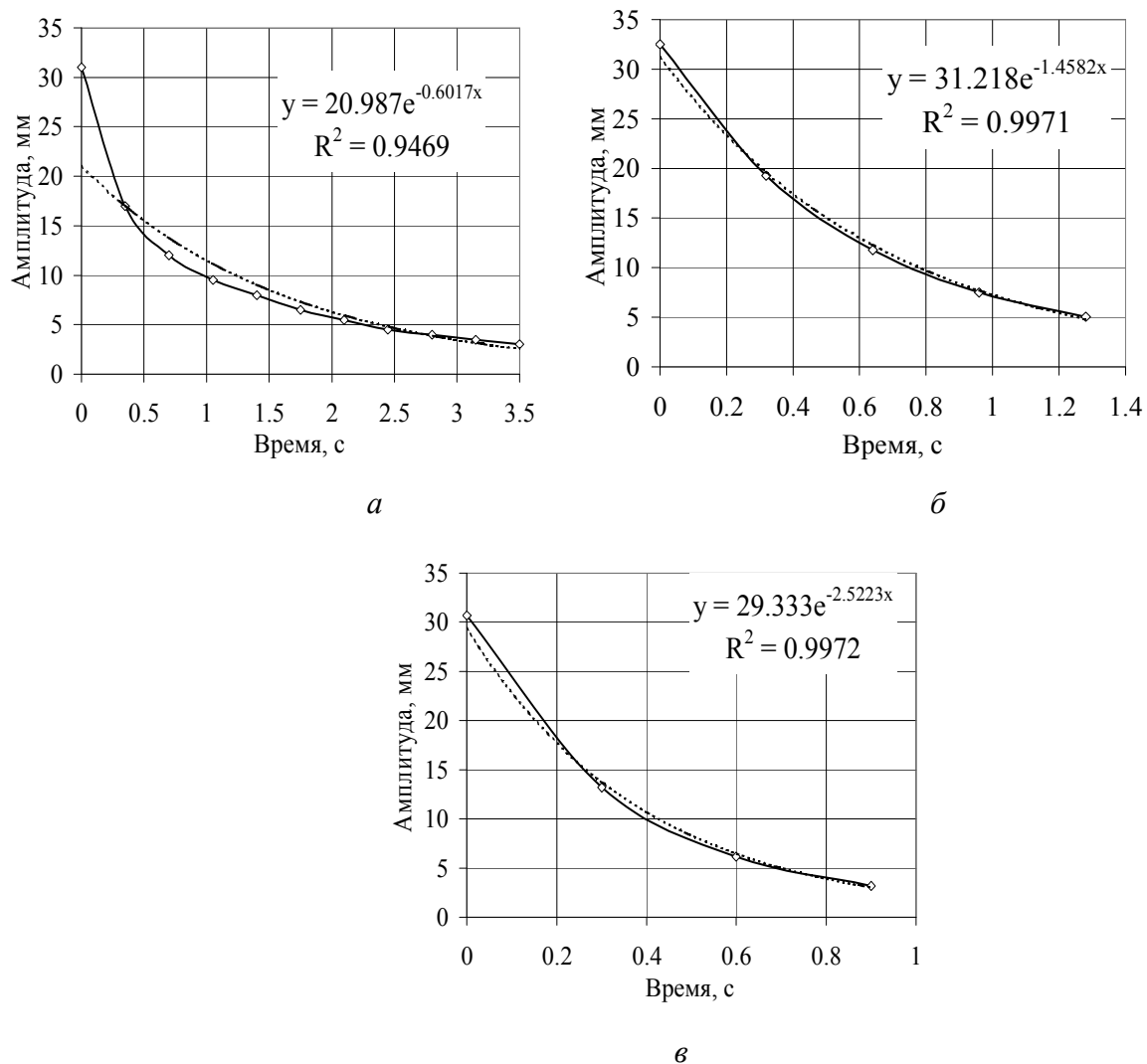
Коэффициент корреляции имеет высокие значения и колеблется в пределах 0,94 – 0,998.

В табл. 1 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<sup>0</sup>С, и составила величину –0,5741 м<sup>2</sup>/нс.

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 С<sub>6</sub>-С<sub>7</sub>, *в* – Т-66

Таблица 1

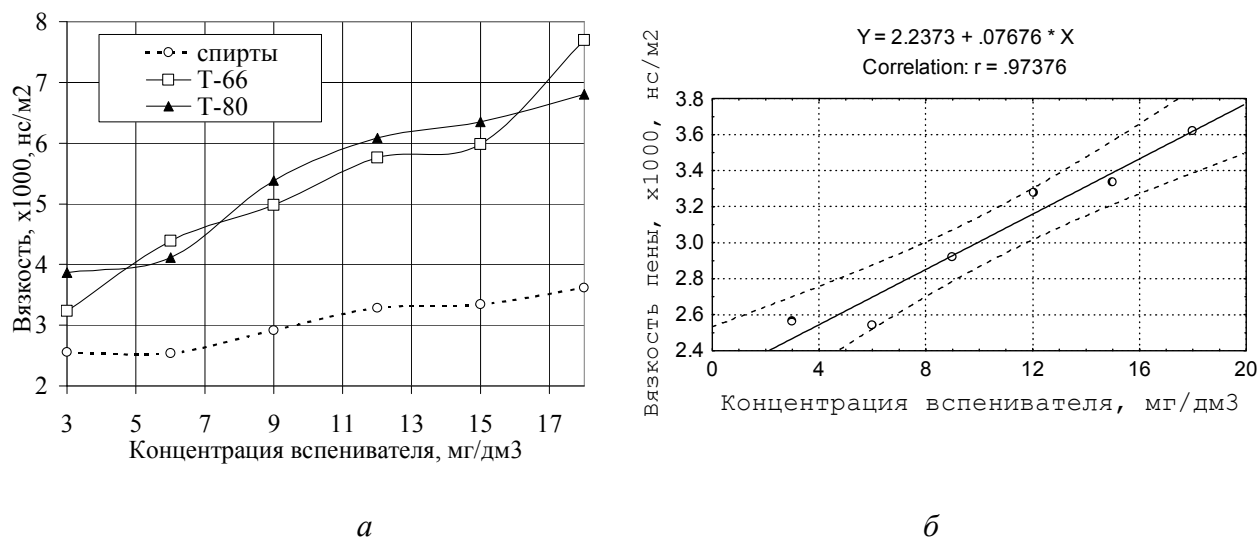
Декремент колебаний и вязкость пен из растворов исследованных вспенивателей

Концентрация, мг/дм <sup>3</sup>	Расход, г/т	Декремент колебаний для вспенивателей:		
		спирты С <sub>6</sub> -С <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

$3.23-5.38 \times 10^{-3}$  нс/м<sup>2</sup> для наиболее широко используемых вспенивателей Т-66 и Т-80, что в 3-5 раз превышает вязкость воды.



**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. Другими важными параметрами, определяющими свойства двухфазных пен, имеющих значение для образования флотационного комплекса «минеральная частица – пузырек воздуха» как элементарного акта флотационного обогащения, являются их дисперсность, скорость коалесценции пузырьков, обводненность, время и скорость разрушения.

#### Список литературы

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. ДАН СССР. - Т.163. – 1965. - №3. – С. 684-685.
8. **Н.В. Сухин, Е.И. Зозуля.** Экспериментальное исследование вязкости двухфазных пен // Обогащение полезных ископаемых. Киев. "Техніка". – 1978. – вып. 23. – С. 67-71.

Рукопись поступила в редакцию 28.05.05