

01;03;11

## **Стабилизация пены поверхностно-активными веществами во фрактально-перколяционной модели разрушения**

© Ю.В. Пахаруков, Т.Е. Шевнина

Тюменский государственный нефтегазовый университет  
E-mail: pakharukov@maitcity.com

Поступило в Редакцию 15 мая 2000 г.

Рассмотрена зависимость устойчивости пены от концентрации поверхностно-активных веществ в пенообразующем растворе. Предлагаемая теоретическая модель строится на основе параметров, отражающих фрактальную структуру пены и ее перколяционные свойства. Установлено, что время начала вытекания жидкости из пенного столба резко увеличивается в узкой концентрационной области.

Применяемые в технике пены должны быть достаточно устойчивыми. Прочность и продолжительность существования зависят от свойств пенного каркаса, которые определяются различными условиями, например природой и количеством присутствующего в системе поверхностно-активного вещества (ПАВ); так, при увеличении концентрации ПАВ в пенообразующем растворе уменьшается скорость стекания жидкости и растет продолжительность истечения. Принято считать, что это связано с усилением взаимодействия между адсорбционными слоями, повышением механической прочности пленок и ростом вязкости [1–3]. В работе [2] исследовались изотермы устойчивости, при этом наблюдалось возрастание характеристического времени  $\tau^*$ , за которое высота столба пены снижалась на 63% в узкой области изменения концентрации ПАВ. Однако изменение прочности пленок и повышение вязкости наблюдались в значительно большем интервале концентрации ПАВ. Такая ситуация требует более внимательного изучения зависимости устойчивости пен от присутствия ПАВ в пенообразующем растворе.

Авторам представляется, что модель устойчивости пены в зависимости от концентрации ПАВ должна строиться не с привлечением большого количества параметров, а на учете процессов, отражающих состояние системы в целом. Такой подход может быть реализован в рамках фрактально-перколяционной модели разрушения пены [4]. В работе [4] рассматривался процесс разрушения на примере полиэдрической модели пенной структуры, представляющей собой систему разветвленных каналов, прерывающихся узлами, в которые входят два ребра (стык пленок), образующие между собой угол  $\Theta = 120^\circ$ . На  $n$ -м уровне существует  $2^n$  ребер, высота  $n$ -го уровня определяется выражением  $h_n = h_1/2^{n-1}$ , где  $h_1$  — высота первого уровня.

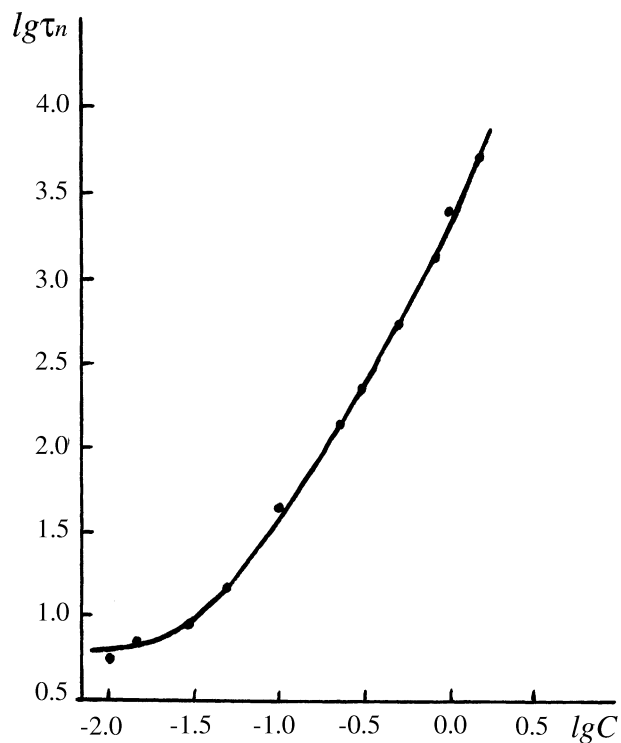
Разрушение пены в данной модели развивается по масштабно-инвариантному механизму переноса нагрузки за счет давления жидкости, прорывающейся через  $n$ -й узел, при этом приложенная нагрузка переносится на соседний узел  $(n - 1)$ -го уровня. В этом случае процесс протекания жидкости удобно представить как движение по узлам иерархического фрактального дерева, высота столба которого равна  $H = \sum_{n=1}^{\infty} h_n = 2h_1$ . Если разрушения нет, то нагрузка от давления жидкости на каждый узел составляет  $P_{on}$ . Разброс размеров ребер, форм каналов, толщин пленок приводит к статистическому распределению значений разрушающей нагрузки узлов  $n$ -го уровня.

Добавление ПАВ приводит к появлению у фрактального дерева некоторой доли  $\alpha$  особо прочных ребер. Вероятность  $\rho_n$  того, что нагрузка превысит разрушающее значение, определяется распределением Вейбулла [5]:

$$\rho_n = (1-\alpha) \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{P_n}{P_{on}} \right)^m \right] \right\} + \alpha \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{P_n}{\gamma P_{on}} \right)^m \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — отношение характеристической нагрузки прочных ребер к характеристической нагрузке непрочных ребер;  $P_n = P \cos(\Theta/2)/2^n$  — средняя нагрузка на каждое ребро  $n$ -го уровня,  $P$  — вертикальная нагрузка, приложенная к уровню  $n = 0$ ;  $m$  — порядок распределения.

Ранее нами [4] была получена формула для расчета критической высоты (порог протекания)  $n$ -го уровня фрактального дерева. С учетом



Изотерма устойчивости пены, полученной из водного раствора ДС-РАС.

изменения концентрации ПАВ эту формулу можно записать в виде

$$h_n = \frac{k_1 \sigma(c)}{2.5 r_0 \rho g} \sqrt{K_{n+1}} - \frac{2 \sigma(c)}{r_0 \rho g} \left[ 1 - \frac{\gamma \cos \frac{\theta}{2}}{0.48 \cdot 2^n} \right], \quad (2)$$

где  $r_0$  — радиус эквивалентного пузырька;  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения;  $c$  — концентрация ПАВ в пенообразующем растворе;  $k_1$  — коэффициент, определяемый моделью пенной структуры (для пентагондодекаэдрической модели  $k_1 = 1.53$ );  $K_{n+1}$  — кратность пены на  $(n + 1)$ -м уровне;  $\rho$  — плотность жидкости;  $g$  — ускорение свободного падения.

При увеличении концентрации ПАВ ряд параметров, входящих в формулу (2), будет изменяться. Так, поверхностное натяжение растворов резко уменьшается, достигая минимального значения, которое потом остается постоянным [3]. Наблюдается также изменение вязкости пенообразующего раствора, некоторое увеличение кратности и размеров пузырьков. Будем считать, что параметр  $\gamma$  пропорционален изменению вязкости раствора. Результаты расчетов показывают, что критическая высота пенного столба существенно увеличивается начиная с некоторой критической концентрации, при которой параметр  $\gamma$  растет гораздо быстрее, чем происходит изменение поверхностного натяжения  $\sigma$ .

На рисунке представлена изотерма устойчивости пены (зависимость времени накопления  $\tau_n \sim \frac{1}{\rho_n}$  от концентрации ( $c$ ) ПАВ) для случая, когда все ребра фрактального дерева одинаково прочные, т.е.  $\alpha = 1$ . Особенностью изотермы является резкое увеличение времени накопления в узкой концентрационной области.

Таким образом, в рамках фрактально-перколяционной модели удалось рассмотреть зависимость устойчивости пены от концентрации поверхностно-активных веществ.

## Список литературы

- [1] Канн К.Б. // Коллоид. журн. 1979. Т. 41. № 4. С. 667–672.
- [2] Бабак В.Г., Вихорева Г.А., Лукина И.Г. и др. Коллоид. журн. 1997. Т. 59. № 2. С. 49–153.
- [3] Измайлова В.Н., Деркач С.Р., Ямпольская Г.П. и др. // Коллоид. журн. 1997. Т. 59. № 5. С. 654–659.
- [4] Пахаруков Ю.В., Шевнина Т.Е. // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 69. № 12. С. 900–903.
- [5] Солла С. Фракталы в физике: Пер. с англ. / Под ред. Синая Я.Г., И.М. Халатникова. М.: Мир, 1988. 670 с.