На правах рукописи

ШЕВНИНА ТАТЬЯНА ЕВГЕНЬЕВНА

ФРАКТАЛЬНО-ПЕРКОЛЯЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПЕНЫ

Специальность 02.00.04-физическая химия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Тюмень – 2004

Работа выполнена в Тюменском государственном нефтегазовом университете

Научный руководитель - д.ф.-м.н, профессор Пахаруков Юрий Вавилович

Официальные оппоненты - д.ф.-м.н, профессор
Аринштейн Эдуард Абрамович

- канд. хим. наук
Хлынова Наталья Михайловна

Ведущая организация - Уральский государственный технический университет (г. Екатеринбург), кафедра теоретической физики и прикладной математики

Защита состоится 25 ноября 2004г. в 16.0 на заседании диссертационного совета К 212.274.04 при Тюменском государственном университете, по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15 а, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке Тюменского государственного университета

Отзыв на автореферат высылать по адресу: 625003, г.Тюмень, ул. Семакова, 10, Тюм ГУ, химический факультет.

Автореферат разослан 25 октября 2004г.

Ученый секретарь диссертационного совета Котова Т.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В последнее время на нефтедобывающих предприятиях все большее применение находят технические двухфазные пены для совершенствования технологических процессов нефтедобычи. Особенно эффективно применение двухфазных пен для вскрытия продуктивных пластов и освоения скважин на нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождениях, вступивших в позднюю стадию разработки. Двухфазные пены успешно применяются для ограничения водопритоков в нефтяные и газовые скважины, воздействия на призабойную зону пласта и др.

Устойчивость пены является одним из основных параметров, определяющих возможность ее использования для тех или иных целей, а проблема исследования устойчивости – это центральная проблема в изучении пен. Процессы перераспределения жидкости в пене с момента ее получения, а также вытекание жидкости из пен (синерезис) имеют прямое отношение к проблеме устойчивости. В виду того, что пена является сложным объектом капиллярной гидродинамики, то наиболее перспективным направлением в описании процессов истечения жидкости является «модельный подход». Попытки аналитического описания процесса синерезиса делались давно. Однако зависимости, получаемые различными авторами, имели определенные ограничения: они неплохо описывали экспериментальные факты авторов, но оказывались непригодными для интерпретации экспериментальных результатов других исследователей.

В существующих теоретических моделях процессы истечения жидкости из пен рассматриваются на уровне отдельных каналов и пленок, а затем полученными уравнениями описывается вытекание жидкости, происходящее во всем объеме пены. Процессы, протекающие в единичных пленках и каналах, естественно, не могут полностью отразить всех явлений, происходящих в таком объекте как пена, обладающем сильно разветвленной структурой. Поэтому ряд экспериментальных фактов до сих пор не имеет удовлетворительного теоретического объяснения.

В такой ситуации актуальность работы связана с необходимостью выяснения механизмов устойчивости пенной структуры и разработкой теоретических моделей, в которых пена рассматривается как целостная система и которые бы адекватно описывали всю совокупность свойств пен.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ - исследование устойчивости и связи механизмов разрушения с особенностями структуры пены.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ:

1. Изучение и анализ существующих теоретических моделей, описывающих структуру пены и процессы вытекания из нее жидкости.
2. Построение математической модели (канторовского фрактала), описывающей эволюцию пенной структуры как системы, обладающей «остаточной» памятью.
3. Построение математической фрактально-перколяционной модели пены, учитывающей ее коллективные свойства.
4. Анализ на основе фрактально-перколяционной модели механизмов разрушения пены.
5. Проведение экспериментального исследования вытекания жидкости из пены с целью выявления параметров теоретической модели, а также установления соответствия между предложенной фрактально-перколяционной моделью и экспериментальными данными.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Построена математическая модель пенной структуры в виде временнóго фрактала, определен лапласовский образ для потока жидкости, вытекающей из пены. Предложена новая фрактально-перколяционная модель пены, описывающая ее устойчивость, на основе модели рассмотрен механизм разрушения пенной структуры, а также дано объяснение перколяционному характеру зависимости высоты пенного столба от времени начала вытекания из него жидкости. Экспериментально установлено, что при разрушении пены образуется бесконечный перколяционный кластер, представляющий собой сложное геометрическое образование, изменяющееся во времени и занимающее промежуточное положение между двумерными и трехмерными объектами. Для бесконечного перколяционного кластера определены основные его характеристики: фрактальная размерность и критический индекс корреляционной длины.

НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1. Математическая модель временно́го поведения пенной структуры, как системы, обладающей «остаточной памятью».

2. Теоретическая модель пены, описывающая механизм ее разрушения, построенная на основе параметров, отражающих фрактальную природу и перколяционные свойства пены, позволяющая учесть взаимосвязь устойчивости со структурой исследуемого объекта.

3. Объяснение на основе фрактально-перколяционной модели механизма разрушения пены и перколяционного характера зависимости высоты пенного столба от времени начала вытекания жидкости.

4. Результаты экспериментального исследования процессов истечения жидкости из пен, подтверждающие образование в пене при ее разрушении бесконечного перколяционного кластера, обладающего дробной размерностью.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ. Сегодня свойства пен и характеристики процессов, протекающих в пенных системах, включаются как технологические параметры в инженерные расчеты различных аппаратов и производств. Поэтому глубокое и адекватное понимание процессов вытекания жидкости из пен представляет не только академический, но и практический интерес для самых разных отраслей народного хозяйства.

В данной работе рассматриваются модели пенной структуры, анализируются процессы, происходящие при вытекании жидкости из пен. Результаты данной работы могут служить основой для постановки и решения других более конкретных задач. Однако полученные выводы уже сейчас могут использоваться в различных областях. Например, результаты, полученные при исследовании механизмов стабилизации пены поверхностно-активными веществами в рамках фрактально-перколяционной модели, могут быть использованы при решении прикладных задач, связанных с применением пен на нефтегазодобывающих предприятиях.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в журналах «Письма в ЖЭТФ» (1999, т.69, №12, с.900 – 903), «Письма в ЖТФ» (2001, т.27, вып. 3, с.85 – 88), «Известия высших учебных заведений. Нефть и газ» (2001, №3, с.22-26), обсуждались на Всероссийской конференции «Проблемы развития топливно-энергетического комплекса Западной Сибири на современном этапе». Тюмень, 2001г., а также на Всероссийской научной конференции «Фракталы и их приложения в науке и технике». Тюмень, 2003г. Всего по теме диссертации опубликовано шесть научных работ, список которых приведен в конце автореферата.

ОБЪЕМ И СТРУКТУРА РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 132 страницах, содержит 15 рисунков. Библиография включает 94 наименования.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю доктору физ.-мат. наук Ю.В. Пахарукову, доктору техн. наук К.Б. Канну за практическую помощь в осуществлении работы и обсуждении полученных результатов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВО ВВЕДЕНИИ показана актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы, основные задачи исследования, защищаемые положения, изложены научная новизна и практическая значимость работы.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ проведен литературный обзор существующих теоретических моделей, описывающих процессы вытекания жидкости из пен.

Реальные пены имеют сложную нерегулярную структуру, их строгое математическое описание представляет значительные трудности. Поэтому для анализа процессов вытекания жидкости из пен используются различные модельные структуры.

Первой моделью пенной структуры была пленочная модель, в которой пена представлена в виде системы тонких вертикальных пленок, протяженных на всю высоту пенного столба. Однако пленочная модель для анализа синерезиса пен неудачна по двум причинам:

1) вытекание жидкости из пленок происходит под действием сил капиллярного всасывания, которые в 20-25 раз превосходят гравитационные силы. Поэтому характерное время перетекания жидкости из пленок в каналы значительно меньше времени, которым определяется процесс истечения жидкости из пен;

2) скорость течения жидкости по пленкам, имеющим размеры, характерные для реальных пен, намного меньше скорости перемещения

жидкости по пенным каналам. Поэтому моделью, которая должна лучше описывать синерезис пен, следует считать капиллярную (каналовую) модель, в которой истечение жидкости происходит из системы вертикальных каналов, протяженных на всю высоту пенного столба.

В открытых капиллярных моделях движение жидкости осуществляется под действием двух сил: силы тяжести и силы вязкого трения. В модели «замкнутых капилляров» учитывается третья сила – градиент капиллярного разрежения, оказывающий значительное влияние на процесс вытекания жидкости из пен. В этой модели пенные каналы, протяженные на всю высоту пенного столба, сверху замкнуты газожидкостными менисками и имеют форму каналов Плато (т.е. поперечное сечение в виде треугольника с вогнутыми внутрь сторонами).

Каналовые (капиллярные) модели являются более совершенными, по сравнению с пленочными моделями. Однако, как пленочные, так и каналовые модели пенной структуры имеют общий существенный недостаток: пенный столб, независимо от его высоты, наличия огромной сети каналов, расположенных под различными углами друг к другу, моделируются лишь группой параллельных каналов и пленок. Это приводит к тому, что в моделях не учитывается взаимосвязь механизмов разрушения со структурой пены и, как следствие, полученные зависимости не могут в полной мере отразить экспериментальные факты. Кроме того, отсутствие учета влияния коллективных свойств пены на процессы вытекания жидкости приводит к тому, что ни одна из капиллярных моделей не может дать объяснение существования некоторого интервала времени, в течение которого не происходит вытекание и остается непонятным, каким образом пена удерживает жидкость в течение длительного времени.

Структура реальных пен, состоящих из множества газовых пузырьков разнообразной формы (от сферической до полиэдрической), мало походила на систему вертикальных независимых каналов. Поэтому логичным был переход к полиэдрической модели пенной структуры: системе взаимосвязанных, беспорядочно ориентированных каналов с поперечным сечением в виде треугольника Плато. Газовые пузырьки в данной модели имеют форму одинаковых полиэдров с «затупленными» ребрами и вершинами.

Полиэдрическая модель хорошо отражает реальную структуру высокократной пены. Пена в данной модели представляет собой связную структурную систему, в которой возможен учет коллективных эффектов, если рассматривать столб пены в целом. Однако, исследования вытекания жидкости проводятся, исходя из анализа процессов, происходящих на локальном уровне. Для данной модели получены уравнения динамики синерезиса, но из-за математических сложностей найдены аналитические решения лишь для некоторых частных случаев.

Наиболее близкой к структуре реальных пен является ячеистая модель. Газовые пузырьки в данной модели имеют форму «смятых» шариков, причем эта форма может меняться от сферической до почти полиэдрической в зависимости от капиллярного разрежения. В ячеистой модели, в отличие от рассмотренных ранее, учитывается полидисперсность пены, что является особенно важным для исследования процессов истечения жидкости, т.к. реальные пены редко бывают монодисперсными. Однако, ввиду сложности формы деформированного газового пузырька и, соответственно, всей пенной структуры, пока не получено простых и достаточно точных зависимостей, описывающих вытекание жидкости из пен.

В конце первой главы приводится постановка задачи.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ рассматривается модель временного поведения (эволюции) пенной структуры.

Полученная в результате перемешивания газожидкостная смесь крайне неустойчива в силу своей неравновесности. В такой системе в момент времени τ под действием силы тяжести $f(\tau)$ возникает поток жидкости, величина которого в следующий момент времени t задается выражением

$$I(t)=\int_0^t k(t-\tau)f(\tau)d\tau,$$

где $k(t-\tau)$ – функция памяти, которая определяется скоростью протекания пенообразующего раствора по каналам.

Чистые жидкости вспенить не удается, т.к. их пленки мгновенно разрушаются. При этом скорость протекания по всем каналам одинакова и газожидкостная смесь представляет собой сеть параллельных каналов релаксации. Поток $I(t)$ для этого случая имеет вид

$$I(t)=\int_0^t \delta(t-\tau)f(\tau)d\tau, \tag{1}$$

где функция памяти представлена как δ-функция.

Выражение (1) соответствует марковскому процессу с полным отсутствием памяти. Это означает, что на поток $I(t)$ влияет только значение силы $f(t)$, действующей в тот же момент времени t.

Добавление поверхностно-активных веществ в пенообразующий раствор делает жидкие пленки более устойчивыми, что позволяет получить из такого раствора пену.

Для исследования временного поведения пены использовалась модель последовательной релаксации, которая представляет собой комбинацию процессов последовательной и параллельной релаксации.

Данная модель подразумевает, что релаксация совершается в несколько стадий, причем наиболее быстрая степень свободы должна релаксировать прежде, чем более медленная. Это означает, что масштаб времен релаксации на уровне n подчинен временам на более низком уровне.

Для отражения иерархической соподчиненности в ансамбле используется геометрический образ дискретного ультраметрического пространства - дерево Кейли.

Функцию памяти для процессов последовательной релаксации представим в виде суммы

$$k(t-\tau)=\sum_{i=1}^{n} P_i k_i(\tau-\tau_i),\ n\to\infty$$

где $k_i(\tau-\tau_i)=\delta(\tau-\tau_i)$ - функция памяти для сети параллельных каналов с временем релаксации τ_{0i};

$P_i = exp\left(-\frac{\tau_i}{\tau_{0i}}\right)$ - вероятность перехода между каналами.

Для систем с идеальной или полной памятью $n\to\infty$, что является отражением бесконечной структурируемости и иерархичности происходящих процессов. Переход от суммирования к интегрированию дает следующее выражение для потока.

$$I(t)=\int_0^t a\, exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right) f(\tau)d\tau,$$

где $a=-\frac{1}{\tau_0}$.

Таким образом, для пенных систем с полной памятью функция памяти имеет вид

$$k(t-\tau)=\begin{cases} a\,exp\left(-\dfrac{\tau}{\tau_0}\right), & 0<\tau<t \\ 0, & \tau>t. \end{cases}$$

Однако для большей части получаемых пен наиболее часто проявляются процессы, занимающие промежуточное положение между «прямой», когда система в процессе эволюции не теряет ни одного состояния за все время t (очень устойчивая пена), и «точкой», когда рассматриваемая система теряет все свои состояния за исключением одного, сосредоточенного в момент времени t с бесконечно большой плотностью (мгновенное разрушение). Это означает, что для таких пен память является неидеальной или «остаточной». Она проявляется на интервале, предшествующем времени t, но не во все моменты τ. В евклидовой геометрии не существует промежуточного объекта между прямой и точкой, а во фрактальной геометрии такой объект есть, он известен под названием множества Кантора. Это множество устроено таким образом, что оно автоматически учитывает недоступность части состояний. Для построения множества Кантора на шаге $n=0$ выбирается весь временной интервал длины t. На первом этапе ($n=1$) удаляется средняя часть отрезка и на его концах остаются два отрезка длины ξt ($\xi<1/2$ - параметр подобия). На следующей стадии разбиения ($n=2$) для двух полученных отрезков проводится такое же построение. Далее указанная процедура повторяется $n\to\infty$ раз. В нашей задаче будем считать, что суммарная площадь всех остающихся полосок на всех этапах разбиения сохраняется постоянной. Это оказывается возможным при использовании масштабного множителя к суммарной площади полосок.

Вклад в интеграл I(t) от 2^n полосок на n-м этапе разбиения записывается так

$$I(t)=a\left(\frac{1-exp\left(-\frac{\Delta_0}{\tau_0}\right)}{1-exp\left(-\frac{\Delta_n}{\tau_0}\right)}\right)\sum_{m=1}^{2^n}\int_{t_m}^{t_{m+1}} a\,exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right)f(\tau)d\tau, \qquad (2)$$

где $\Delta_n=\xi^n t$ - длина отрезков на n-м этапе; $\Delta_0=t$ - при n=0.

Для установления связи между дробным интегралом и фрактальным множеством Кантора использовалась ступенчатая функция

$$\eta(t_1<\tau<t_2)=\begin{cases} exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right),\ \tau\in[t_1,t_2] \\ 0,\ \text{если } \tau \text{ вне отрезка}\end{cases} \qquad (3)$$

Совместное использование формул (2) и (3) дает следующее выражение для потока

$$I(t)=a\left(\frac{1-exp\left(-\frac{\Delta_0}{\tau_0}\right)}{1-exp\left(-\frac{\Delta_n}{\tau_0}\right)}\right)\int_0^t\sum_{m=1}^{2^n}\eta(t_m<\tau<t_{m+1})f(\tau)d\tau. \qquad (4)$$

Лапласовский образ выражения (4) равен

$$I(t)=a\tau_0 2^n\left(1-exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right)\right)2^{-\nu/2}\left(p+\frac{1}{\tau_0}\right)^{-\nu}t^{-\nu}(1-\xi)^{-\nu}F(p),$$

где F(p) – лапласовский образ силы f(τ);

p – комплексная переменная.

Показатель $\nu = \ln 2/\ln(1/\xi)$ указывает долю сохранившихся состояний и совпадает с фрактальной размерностью множества Кантора, в точках которого включается память. Этот показатель представляет собой количественную меру проявления эффектов памяти. Для пустого множества Кантора (ξ=0) ν=0, что соответствует полному отсутствию памяти. С увеличением параметра подобия ξ>0 показатель ν возрастает. Предельное значение параметра подобия ξ=1/2 дает значение ν=1, отвечающего идеальной памяти.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ предложена фрактально-перколяционная модель пены, описывающая механизм ее разрушения, позволяющая учесть взаимосвязь устойчивости со структурой исследуемого объекта. За основу взята полиэдрическая модель пенной структуры, представляющая собой систему взаимосвязанных беспорядочно ориентированных каналов с поперечным сечением в форме треугольника Плато, а также модель разрушения нагруженного фрактального дерева.

Системе разветвленных каналов ставится в соответствие регулярное фрактальное иерархическое дерево Кейли, из каждой вершины (узла полиэдрической структуры) которого выходят два ребра (стык пленок), образующие между собой угол θ=109,5°. Значение угла взято в соответствии с правилами Плато. На n-м уровне существует 2^n ребер, соединяющих каждую вершину (n-1)-го уровня с двумя вершинами n-го порядка. Высота n-го уровня равна $h_n = h_1 / 2^{n-1}$, а высота всего дерева будет $H = \sum_{n=1}^{\infty} h_n = 2h_1$.

В ряде экспериментальных работ отмечено влияние высоты столба пены на скорость синерезиса. Было показано, что процесс вытекания жидкости при одинаковой кратности пены начинается тем раньше, чем больше высота пены, а при некоторой высоте, соответствующей данной кратности, вообще прекращается. Фрактальное дерево, которым моделируется пенный столб такой высоты в отсутствии вытекания, является ненагруженным. Увеличение высоты столба пены при постоянной кратности или увеличение содержания в нем жидкости приводит к появлению дополнительной нагрузки $P_n = P\,cos\left(\theta/2\right)/2^n$ на ребра фрактального дерева, где P – нагрузка (давление), приложенная к уровню $n=0$, оказываемая добавленной массой жидкости. Разрушение нагруженного фрактального дерева связывается с процессами вытекания из него жидкости.

В состоянии равновесия для жидкости внутри каналов n-го уровня выполняется равенство

$$\mathrm{grad}P_{0n} + \rho\vec{g} = 0,$$

P_{0n} - давление в пенных каналах;

ρ - плотность пенообразующего раствора;

g - ускорение свободного падения.

Если давление P_n превышает критическое давление $P_c = 0{,}48P_{0n}$, это приводит к нарушению гидростатического равновесия в каналах и вытеканию из них жидкости.

Вероятность того, что $P_n > P_c$ определяется распределением Вейбулла

$$\rho_n = 1 - exp\left\{-\left(P_n/P_{0n}\right)^m\right\},$$

где m – порядок распределения.

Разрушение пены в предлагаемой модели развивается по масштабно-инвариантному механизму переноса нагрузки: если в одном из ребер n-го уровня нарушается гидростатическое равновесие, то во втором ребре при этом также может начаться вытекание жидкости от дополнительной нагрузки. Стекающая жидкость создает дополнительное давление на ребра (n-1)-го уровня и приводит к нарушению гидростатического давления в них. Таким образом, катастрофическое разрушение пенной структуры при P_c обусловлено резким ростом той части фрактального дерева, где произошло нарушение гидростатического равновесия и началось вытекание жидкости.

Из результатов экспериментов по изучению влияния высоты пенного столба h на время начала вытекания жидкости (время накопления) τ_n следует, что при больших высотах пенного столба h время начала вытекания практически не зависит от h, но, когда высота становится меньше некоторой h_0, τ_n начинает быстро расти, а при $h = h_c$ вытекание прекращается совсем. Наличие характерных высот h_0 и h_c указывает на то, что разрушение пенного столба происходит по перколяционному типу.

Анализ модели пены в виде нагруженного фрактального дерева, в которой учитываются «коллективные» свойства пены, дает возможность объяснить перколяционный характер зависимости $\tau_n(h)$. При $h < h_c$ вытекание жидкости из пены отсутствует, т.к. практически для всех каналов выполняется условие гидростатического равновесия. С ростом высоты столба пены при $h_c < h < h_0$ увеличивается содержание в нем жидкости и возрастает дополнительная нагрузка на каналы пенной структуры, что приводит к нарушению гидростатического равновесия в некоторой еще малой части каналов. Начиная с высоты столба пены h_0, дополнительной нагрузки, вызываемой жидкостью, находящейся в вышележащих слоях, оказывается достаточно для превышения критических значений давлений в значительной части пенных каналов, т.е. при $h > h_0$ процессы вытекания жидкости больше не зависят от высоты пенного столба.

Для определения высоты h_n фрактального дерева, в ребрах которого на данном уровне P_n превысило P_c, получено следующее выражение

$$h_n = \frac{K_1 \sigma}{2{,}5 r_0 \rho g} \cdot \frac{1}{\sqrt{\gamma_{n+1}}} - \frac{2\sigma}{\rho g r_0}\left[1 - \frac{cos\frac{\theta}{2}}{2^n \cdot 0{,}48}\right], \tag{5}$$

где K_1 - коэффициент, определяемый моделью пенной структуры;

σ - коэффициент поверхностного натяжения;

r_0 - средний радиус пенных пузырьков;

γ_{n+1} - объемная плотность на (n+1)-м уровне.

Использование данной формулы дает возможность рассчитать высоту пенного столба h_0, начиная с которой τ_n не зависит от h. Результаты расчетов, проведенных с использованием формулы (5), находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

В рамках фрактально-перколяционной модели рассмотрена зависимость устойчивости пены от концентрации ПАВ в пенообразующем растворе. Добавление ПАВ приводит к появлению у фрактального дерева некоторой доли α особо прочных ребер. Вероятность ρ_n того, что $P_n > P_c$ для ребер n-го уровня также определяется распределением Вейбулла:

$$\rho_n = (1-\alpha)\left\{1 - exp\left[-\left(\frac{P_n}{P_{0n}}\right)^m\right]\right\} + \alpha\left\{1 - exp\left[-\left(\frac{P_n}{\beta P_{0n}}\right)^m\right]\right\},$$

где β - отношение характеристической нагрузки прочных ребер к характеристической нагрузке непрочных ребер, причем β>1.

Таким образом, показателем устойчивости пенной структуры во фрактально-перколяционной модели является параметр β. Так как основным фактором устойчивости пен, стабилизированных высокомолекулярными пенообразователями, является структурно-механический фактор (эффект Ребиндера), то параметр β должен быть пропорционален вязкости пенообразующего раствора:

$$\beta \sim \eta\left(1+\varepsilon \mathrm{C}\right),$$

где ε определяет степень роста β в зависимости от концентрации (С).

Проводилось исследование зависимости времени накопления τ_n от концентрации ПАВ в пенообразующем растворе для водных пен, полученных с помощью следующих пенообразователей: сульфонола НП-1, ПО-1А, ДС-РАС с добавлением стабилизатора КМЦ-600, при условии, что все ребра фрактального дерева являются одинаково прочными, т.е. α=1. Для расчётов использовались литературные данные для вязкости и поверхностного натяжения в зависимости от концентрации ПАВ для данных пенообразующих растворов.

Для времени накопления получена следующая формула

$$\tau_n \sim \left(1-\exp\left\{-\left[\frac{\dfrac{2\sigma(C)}{r_0}}{\beta\left(\rho g h_n-\dfrac{2\sigma(C)}{r_0}\left[\dfrac{k_1}{5\sqrt{\gamma_{n=1}}}-1\right]\right)}\cdot\frac{\cos\theta/2}{2^n}\right]^m\right\}\right)^{-1}$$

.Расчет зависимости $\tau_{\mathrm{n}}(\mathrm{c})$ проводился для столба пены высотой h_0, которая равна высоте уровня n=0 фрактального дерева.

Результаты расчетов представлены на рис.1. Характерной особенностью зависимости $\tau_n(c)$ является резкое увеличение времени накопления в узкой области изменения концентрации ПАВ. Для пен, полученных из водного раствора сульфонола НП-1, проведено сравнение результатов расчётов с данными экспериментов. Теоретическая кривая хорошо согласуется с экспериментальной кривой.

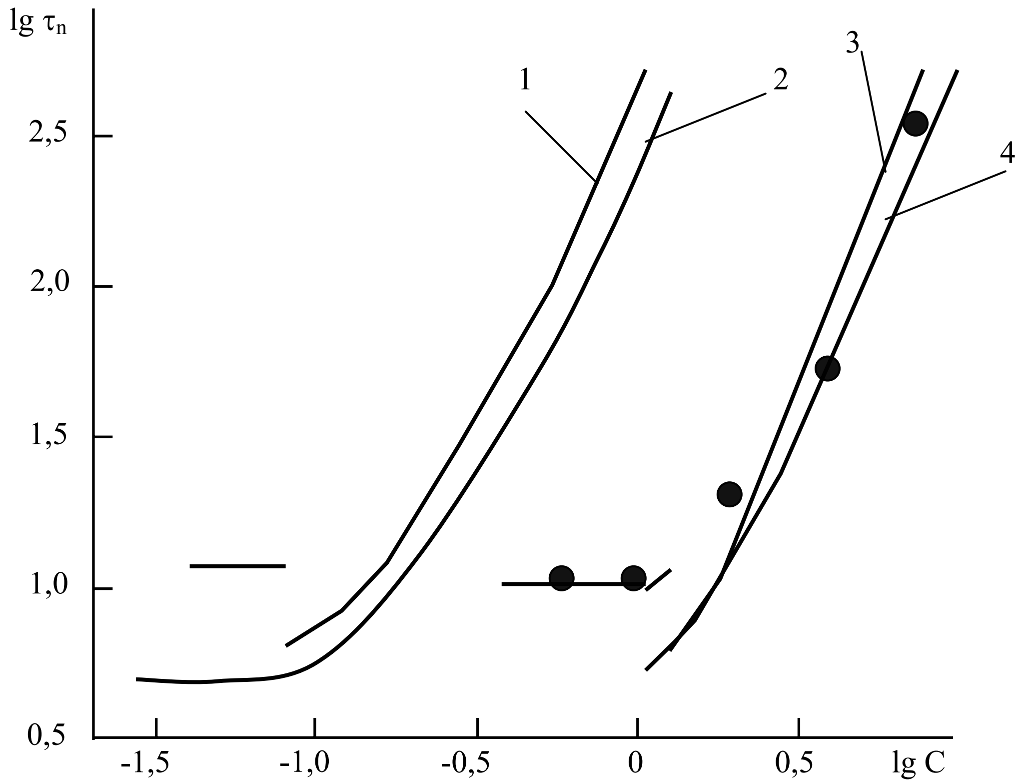

Рис. 1. Зависимость устойчивости (времени накопления) от концентрации ПАВ в пенообразующем растворе для пен : 1 – из водного раствора ДС-РАС с добавлением стабилизатора КМЦ-600; 2 - из водного раствора технического пенообразователя ПО-3А; 3 - из водного раствора сульфонола НП-1; 4 – экспериментальная кривая для пен, полученных из водного раствора сульфонола НП-1 при t=20 ^{0}C.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА посвящена экспериментальному исследованию процессов вытекания жидкости из пен.

Согласно положениям теории перколяции высоту пенного столба h_c можно назвать порогом протекания. При $h = h_c$ впервые образуется бесконечный перколяционный кластер (БК), представляющий собой взаимосвязанную систему каналов, по которой происходит вытекание жидкости из пены. Основными характеристиками БК являются его фрактальная размерность D и критический индекс β, определяющий плотность БК. Экспериментальное исследование перколяционного перехода в пене
(определение D и β) дает возможность получить необходимую информацию о строении и образовании геометрической структуры, по которой происходит вытекание жидкости.

Экспериментальное изучение вытекания жидкости из пен проводилось на пенах, полученных с помощью смесительно-струйного пеногенератора методом «подвешенного пенного столба». В качестве пенообразующей композиции был использован водный раствор сульфонола с концентрацией 2% при температуре 20˚С.

Результаты измерений для пены с кратностью К=29 приведены на рис.2. Полученный график имеет явно перколяционную природу: при $h > h_0$ зависимость τ_n от h слабая, но когда h становится меньше h_0,

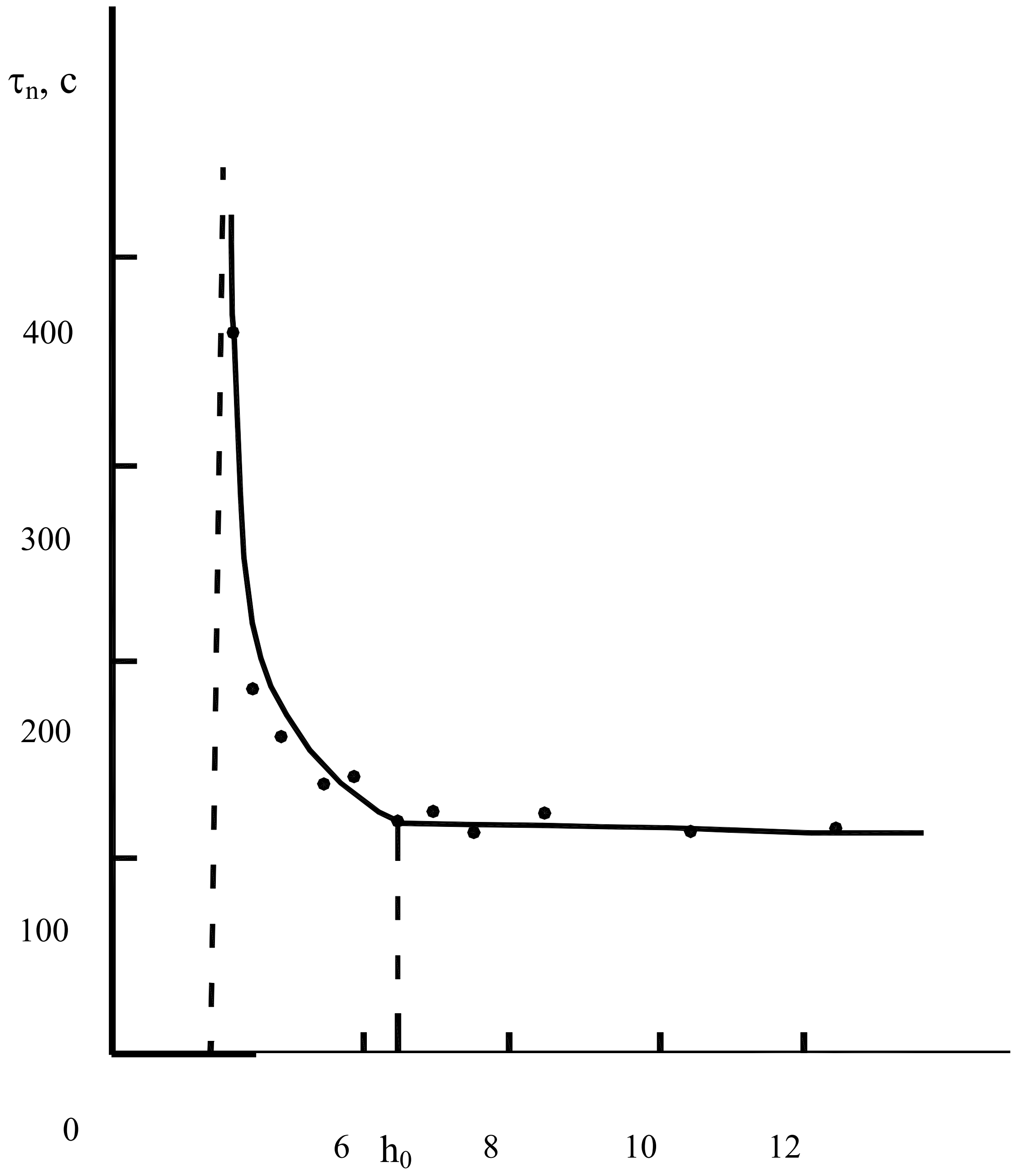

Рис. 2. Зависимость времени накопления
от высоты пенного столба.

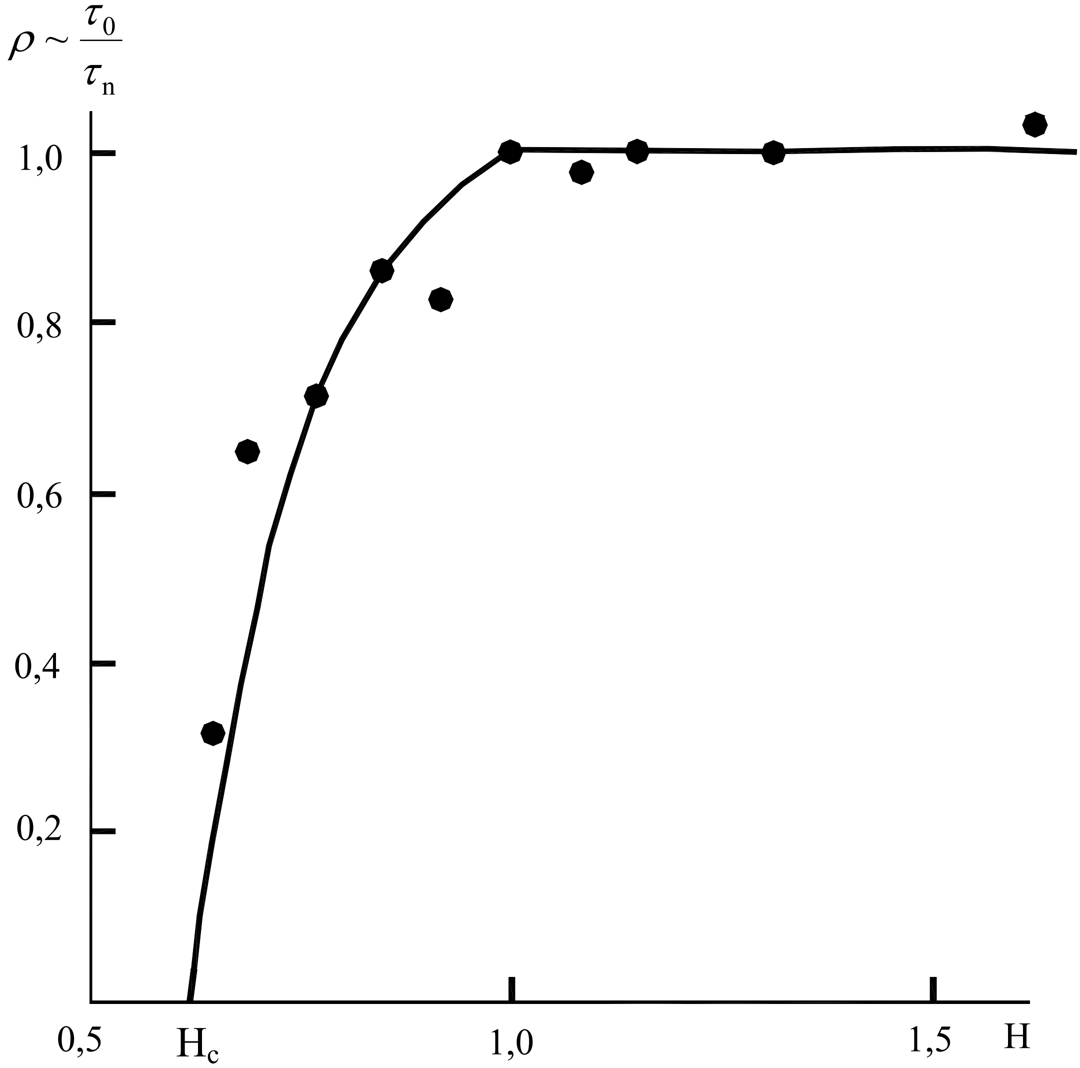

Рис. 3. Зависимость вероятности начала вытекания жидкости от высоты пенного столба.

характер зависимости существенно меняется: наблюдается резкий рост времени накопления.

На рис.3. приведены те же экспериментальные результаты, но в иной зависимости. По оси абсцисс отложена безразмерная высота пенного столба H $\left(H = \frac{h}{h_0}\right)$, а по оси ординат – вероятность начала вытекания жидкости $\rho \sim \frac{\tau_0}{\tau_n}$. Порогом протекания является верхняя граница высоты пенного столба Н, для которых ρ=0. За порогом протекания функция $\rho(\mathrm{H})$ непрерывно возрастает до единицы и описывается соотношением

$$\rho \sim \left(\mathrm{H}-\mathrm{H}_{c}\right)^{\beta},$$

где $\mathrm{H}=\frac{\mathrm{h}_{c}}{\mathrm{h}_{0}}$ - безразмерная критическая высота пенного столба.

Многочисленными расчетами было показано, что БК обладает фрактальной геометрией. Между фрактальной размерностью D бесконечного перколяционного кластера и критическим индексом корреляционной длины ν существует зависимость

$$D=d-\beta/\nu,$$

где d - размерность пространства. Для d=3 β=0,4, а ν=0,88. С использованием метода наименьших квадратов для пены, полученной в нашем эксперименте,

было определено значение β, которое составило (0,42±0,10) и D=2,52±0,11. Значение фрактальной размерности указывает на то, что при вытекании жидкости из пены образуется протекательная структура, представляющая собой сложное геометрическое образование, занимающее промежуточное положение между двумерными и трехмерными объектами и изменяющееся во времени.

Проведенный эксперимент наглядно показал, что для адекватного описания процессов вытекания жидкости из пены необходимо учитывать процессы, происходящие во всем объеме пенной структуры, а не в отдельных каналах и пленках, как это делается в различных теоретических моделях.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена математическая модель временнóго поведения пенных систем, обладающих различной устойчивостью. Показано, что быстроразрушающиеся пены, относящиеся к марковским системам с полным отсутствием памяти, представляют собой набор параллельных каналов с одинаковыми временами релаксации. Пены с большим временем жизни, являющиеся системами с полной памятью и пены с «остаточной» памятью можно представить комбинацией последовательных и параллельных процессов с иерархическим подчинением статистических ансамблей.

2. Для пен с «остаточной» памятью, эволюция которых описывается фрактальным множеством Кантора, определен лапласовский образ, где величина показателя $0 \leq \nu \leq 1$ определяет меру сохранения памяти и совпадает с фрактальной размерностью множества Кантора.

3. Предложена математическая фрактально-перколяционная модель пены, описывающая ее устойчивость. В данной модели пенная структура рассматривается как целостная система, обладающая коллективными свойствами.

4. На основе предложенной модели рассмотрен механизм разрушения пены, а также дано объяснение перколяционному характеру зависимости высоты пенного столба от времени начала вытекания жидкости.

5. Получена формула для расчета высоты h_n n-го уровня фрактального дерева, используя которую можно определить высоту пенного столба h_0, начиная с которой ($h > h_0$) время начала вытекания жидкости больше не зависит от высоты пенного столба.

6. В рамках фрактально-перколяционной модели рассмотрена устойчивость пены в зависимости от концентрации ПАВ в пенообразующем растворе. Для пен, полученных с использованием

пенообразователей ДС-РАС, ПО-1А, сульфонола НП-1 проведено исследование зависимости времени начала вытекания жидкости от концентрации ПАВ, характерной особенностью которой является резкое увеличение времени накопления в узкой области изменения концентрации ПАВ. Полученные результаты хорошо согласуются с данными экспериментов.

7. Проведено экспериментальное исследование вытекания жидкости из пены методом «подвешенного пенного столба».

8. Установлено, что при разрушении в пене образуется протекательная структура в виде бесконечного перколяционного кластера, обладающего дробной размерностью и изменяющегося во времени. Расчетное значение высоты пенного столба h_0, полученное по теоретической формуле находится в хорошем согласии с экспериментальным значением. Таким образом, проведенное экспериментальное исследование подтверждает правомерность применения фрактально-перколяционной модели для описания процессов вытекания жидкости из пены.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Пахаруков Ю.В., Шевнина Т.Е. Фрактально-перколяционная модель устойчивости пены//Письма в ЖЭТФ. - 1999. - т.69. - №12. – с. 900-903.

2. Пахаруков Ю.В., Шевнина Т.Е. Фрактально-перколяционная модель пены//Известия высших учебных заведений «Нефть и газ». - 2001. - №3. - с.22-26.

3. Пахаруков Ю.В., Шевнина Т.Е. Стабилизация пены поверхностно-активными веществами во фрактально-перколяционной модели разрушения//Письма в ЖТФ. - 2001. - т.27. - вып.3. - с.85-88.

4. Пахаруков Ю.В., Шевнина Т.Е., Патракова Е.П. Фрактальная модель образования пены//Тезисы докладов. Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы развития топливно-энергетического комплекса Западной Сибири на современном этапе». – Тюмень, 2001. - с.55-56.

5. Шевнина Т.Е., Патракова Е.П. Синерезис пены как перколяционный процесс//Тезисы докладов. Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы развития топливно-энергетического комплекса Западной Сибири на современном этапе». - Тюмень, 2001. - с.82-83.

6. Пахаруков Ю.В., Шевнина Т.Е., Патракова Е.П. Экспериментальное определение перколяционных характеристик пенной структуры//Тезисы докладов. Всероссийская научная конференция «Фракталы и их приложения в науке и технике».- Тюмень,2003.-с.149-152.