

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕНООБРАЗОВАНИЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Амелькин С.В., Ахметов А.Т., Губайдуллин А.А., Шнайдер А.В.  
Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики СО РАН  
Институт проблем повышения нефтеотдачи  
Тюменского государственного нефтегазового университета

*Изучены процессы формирования пены, ее течения и разрушения в пористых средах при последовательной закачке пенообразующего раствора и газа, включая случай наличия остаточной нефти в пористой среде.*

### Введение

Пена и пористые среды, обладающие собственными уникальными свойствами, вместе порождают новый физический объект, привлекательный с различных точек зрения (Корнев, 2001; Alexandrov et al, 2000). Явления структурообразования и течение пены в пористых средах представляет пример сильно нелинейного гидродинамического процесса, в котором важную роль играют динамические эффекты смачивания и локальные пульсации параметров состояния газожидкостной системы (Rossen, 1995; de Gennes, 1992). Технологические приложения свойств пены в пористых средах достаточно разнообразны и связаны, в основном, с блокированием газовых путей пеной. В настоящее время это свойство пены широко используется в технологиях добычи нефти и газа, для очистки пористых сред от загрязнений и т.п. (Chambers et al, 1991; Owete et al, 1987; Ransohoff et al, 1988)

К настоящему времени выполнено большое число лабораторных исследований по течению приготовленной *in vitro* пены в пористых средах на насыпных моделях и кернах нефтеносной породы (Корнев, 2001; Alexandrov et al, 2000). Однако промышленными испытаниями установлено, что наиболее высокие результаты от использования пенных систем дает применение последовательно – циклической закачки в пласт пенообразующего раствора и газа. Вопросы формирования и течения пены при последовательной и последовательно – циклической закачке в пористую среду пенообразующего раствора и газа гораздо

менее изучены. Особенностью формирования и течения пены при последовательно - циклической закачке в пористую среду пенообразующего раствора и газа является циклический переход пены в газожидкостную смесь (водный раствор поверхностно – активного вещества с пузырьками газа) при закачке раствора с последующим восстановлением пенной системы при закачке газа, а также развитие нестационарных режимов многофазного фильтрационного течения. Исследование кинетики трансформации и динамики течения пенно – газожидкостной системы при последовательно - циклической закачке пенообразующего раствора и газа в насыщенную нефтью пористую среду является сложной задачей и требует привлечения современных представлений и методов механики многофазных систем.

Цель данного экспериментального исследования – изучение процессов формирования пены, ее течения и разрушения в пористых средах при последовательной закачке пенообразующего раствора и газа, включая случай наличия остаточной нефти в пористой среде.

## 1. Экспериментальные методы

Для исследования формирования и течения пены в пористых средах наиболее информативными в настоящее время являются методы, связанные с визуализацией многофазных фильтрационных течений. Эффективный метод визуального исследования процессов в пористых средах основан на использовании прозрачной плоской модели пористой среды. Метод позволяет изучать процессы в пористых средах на различных пространственных масштабах (в масштабе пор и в масштабе модели) и использовать различные оптические способы регистрации и анализа изображений.

Схема экспериментальной установки для исследования формирования, течения и разрушения пены при последовательно-циклической закачке пенообразующего раствора и газа на базе прозрачной плоской модели пористой среды приведена на рис.1. Пористый слой изготовлен фотолитографическим способом на стеклянной пластине с площадью травления  $20 \times 40$  мм<sup>2</sup>, глубиной травления пор 15 мкм. Слой имеет пористость 55% и проницаемость 600 мД. Отличительной особенностью модели является ее разборность и отображение

структурой пор картины аншлифа нефтеносного керна. Разборность модели обеспечивается высокой плоскостностью поверхностей стеклянных пластин, которые собираются практически на оптическом контакте. Схематическое изображение модели пористой среды показано на рис.2, где указан (в масштабе) один из участков модели, наблюдаемый в микроскоп со 100–кратным увеличением. Схема регистрации и измерений с использованием цифровой видеозаписи и высокочувствительных электронных весов позволяет проводить обработку всей информации в цифровом виде на компьютере.

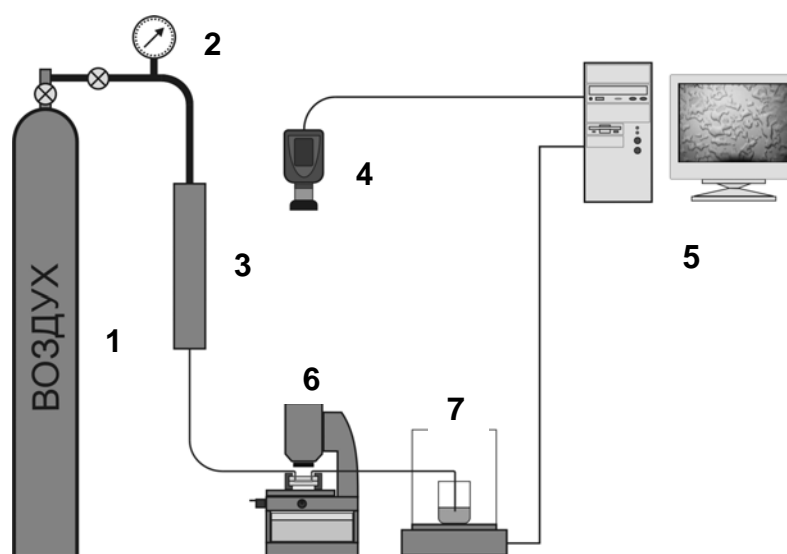


Рис. 1. Схема установки для исследования образования и течения пены в плоской модели пористой среды:  
 1 – газовый баллон, 2 – образцовый манометр, 3 – ресивер, 4 – цифровая видеокамера, 5 – компьютер, 6 – микроскоп с моделью, 7 – электронные весы.

Все эксперименты проводились при комнатной температуре. В качестве пенообразующего раствора в экспериментах использовались 0.5% растворы сульфанола (ионогенное поверхностно-активное вещество (ПАВ)) и неанола (неионогенное ПАВ) в дистиллированной воде, насыщенной газом при нормальных условиях. Для изучения влияния нефти на формирование и движение пены использовалась нефть.

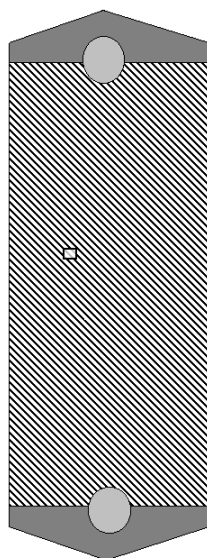


Рисунок 2. Схема прозрачной плоской модели пористой среды. Размеры модели 40 x 20 мм, глубина пор 15 мкм, диаметр входного и выходного отверстий 2 мм. Наблюдаемая под микроскопом область 1x0,8 мм (показана прямоугольником).

## 2. Образование и трансформация пены в пористой среде

### 2.1. «Быстрый» переход «влажной» пены в «сухую»

При исследовании трансформации «влажной» пены в «сухую» и обратно установлено, что переход ««влажная» пена – «сухая» пена» может осуществляться двумя способами. Первый («быстрый») способ обеспечивается в основном механизмом гидродинамической неустойчивости течения при образовании пены. При значениях перепада давления между входом и выходом модели пористой среды в диапазоне от 0,05 МПа до 0,1 МПа в процессе вытеснения воздухом пенообразующего раствора возникают сильные флуктуации скорости течения в порах из-за геометрической неоднородности поровых каналов (диаметр пор меняется в диапазоне от 10 мкм до 250 мкм). Наблюдения в масштабе пор показывают, что колебания скорости течения приводят к дроблению «вязких пальцев», вытесняющих пенообразующий раствор, и образованию пузырьков с размерами, близкими к размерам пор. При сближении этих пузырьков под действием перепада давления формируется «влажная» пена (рис. 3). Такая пена характеризуется сравнительно невысоким

гидродинамическим сопротивлением (в 2 – 10 раз больше, чем у воды). Время образования пены составляет секунды – десятки секунд в зависимости от приложенного перепада давления. Если давление поддерживается неизменным, то «влажная пена» достаточно быстро (от нескольких секунд до нескольких десятков секунд) превращается в «сухую» пену, при этом растет количество пленок пены. Процесс перехода в этом случае заключается в дополнительном вспенивании пенообразующего раствора, содержащегося в свободном виде в мелких порах и в каналах Плато, образующихся в местах соединения пленок «влажной пены». Визуально такой переход наблюдается в модели в виде вторичной волны «вспенивания», бегущей по порам с «влажной» пеной и переводящим ее в «сухое» состояние. Образовавшаяся «сухая» пена отличается более высокой плотностью и значительно более высоким гидродинамическим сопротивлением (на 2 – 3 порядка больше, чем у воды).

При более высоких перепадах давления  $\Delta P > 0,1 \text{ МПа}$  происходит быстрое (несколько секунд) вытеснение газом «влажной» пены из пористой среды без ее трансформации в «сухую».

## **2.2 «Медленный» переход «влажной» пены в «сухую»**

Другой («медленный») способ образования «сухой» пены из «влажной» реализуется в диапазоне перепадов давления от 0,01 МПа до 0,05 МПа. В этом случае «влажная» пена, формируясь, постепенно прекращает движение (на временах от нескольких минут до нескольких десятков минут), то есть наблюдается «блокирующий» режим течения. Если снять перепад давления, то пена в пористой среде может сохранять свою структуру достаточно долго, в течение нескольких недель. Однако, при сохранении перепада давления через длительный промежуток времени (от нескольких часов до нескольких суток) пена в модели становится «сухой» за счет испарения воды из пленок и выноса паров воды из пены потоком газа.

Отметим, что течение «сухой» пены отличается от течения «влажной» пены. При течении «сухой» пены новые пленки не образуются, и она вытекает из модели с постоянным расходом (при фиксированном перепаде давления).

### 2.3 Переход «сухой» пены во «влажную»

Обратный переход «сухой» пены во «влажную» возможно осуществить при повторной подаче в пористую среду пенообразующего раствора. Такой переход наблюдается только при медленном повышении входного давления. Быстрое повышение входного давления приводит к разрушению «сухой» пены с образованием газожидкостной смеси (пузырьковой жидкости).

Эксперименты проводились с «сухой» пеной, полученной «быстрым» способом. Если приложить перепад давления немного больший, чем тот, при котором пена была получена, то жидкость начнет проникать в пленки пены. Это приведет к утолщению пленок пены и превращению «сухой» пены во «влажную» (рис. 4). Визуально на модели такой процесс наблюдался в виде распространения волны «увлажнения». При достижении фронтом волны выхода модели пористой среды процесс превращения «сухой» пены во «влажную» заканчивался, и дальнейших изменений не происходило.

### 2.4 Поведение пены в пористой среде при закачке воды

Изучалась устойчивость пены при вытеснении ее жидкостью. Установлено, что при вытеснении водой пена остается неподвижной и не изменяет свою структуру до значения перепада давления, при котором она была создана. При этом наблюдается медленная фильтрация жидкости со скоростью, равной скорости двухфазной фильтрации при данной малой насыщенности пористой среды жидкостью (Бернард и др., 1968). При перепаде давления выше указанного вода начинает проникать в пленки пены и она разрушается, превращаясь в пузырьковую жидкость (рис. 5). Скорость фронта разрушения пены нелинейно (кубически) зависит от давления на входе модели (рис. 6). После достижения фронтом разрушения выхода модели наблюдается двухфазная фильтрация образовавшейся пузырьковой жидкости.

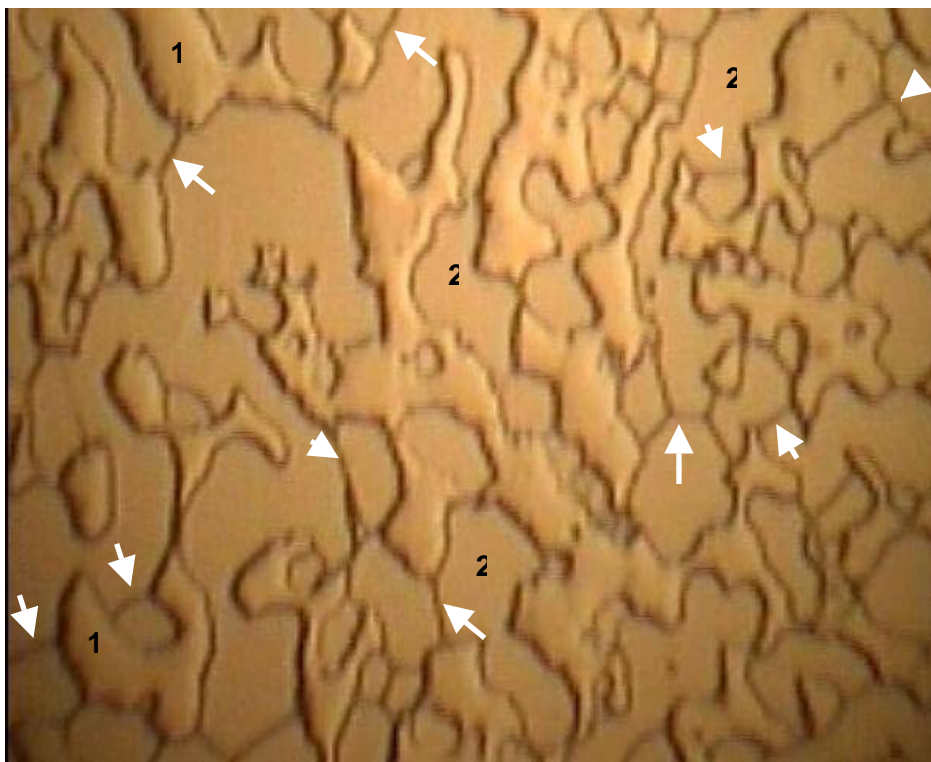
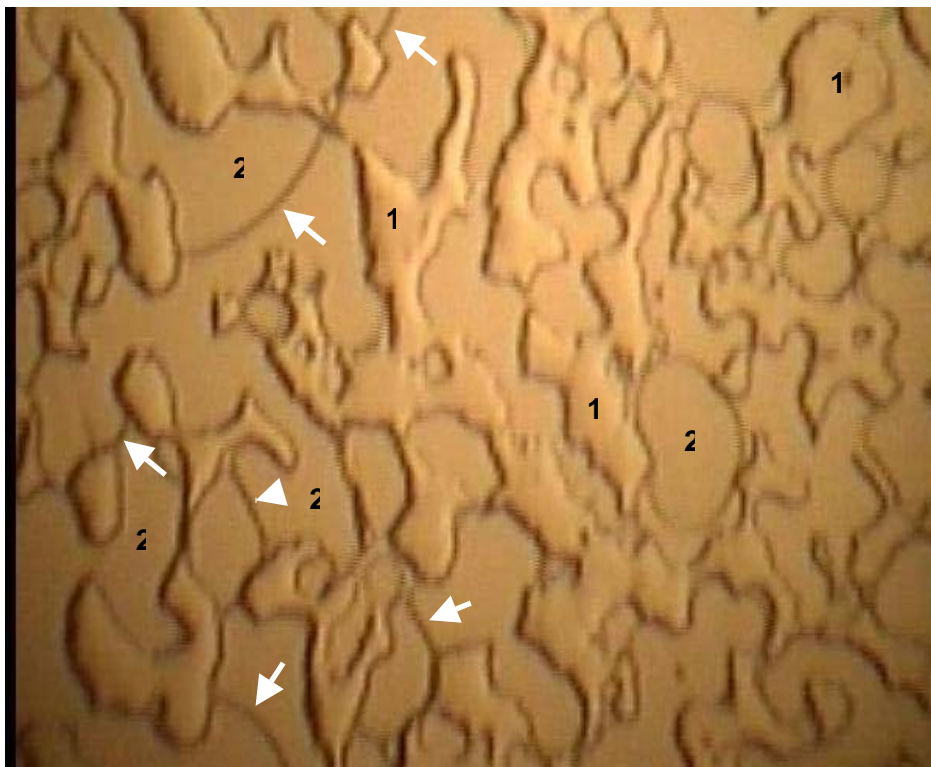


Рисунок 3. Фотоснимки пористой среды в масштабе пор, иллюстрирующие «быстрый» переход «влажной» пены в «сухую»:  
 вверху – «влажная» пена; внизу – «сухая» пена. Время между кадрами 5 с.  
 Обозначения на рисунке (здесь и далее):  
 1 – скелет, 2 – поры, стрелками показаны пленки пены.

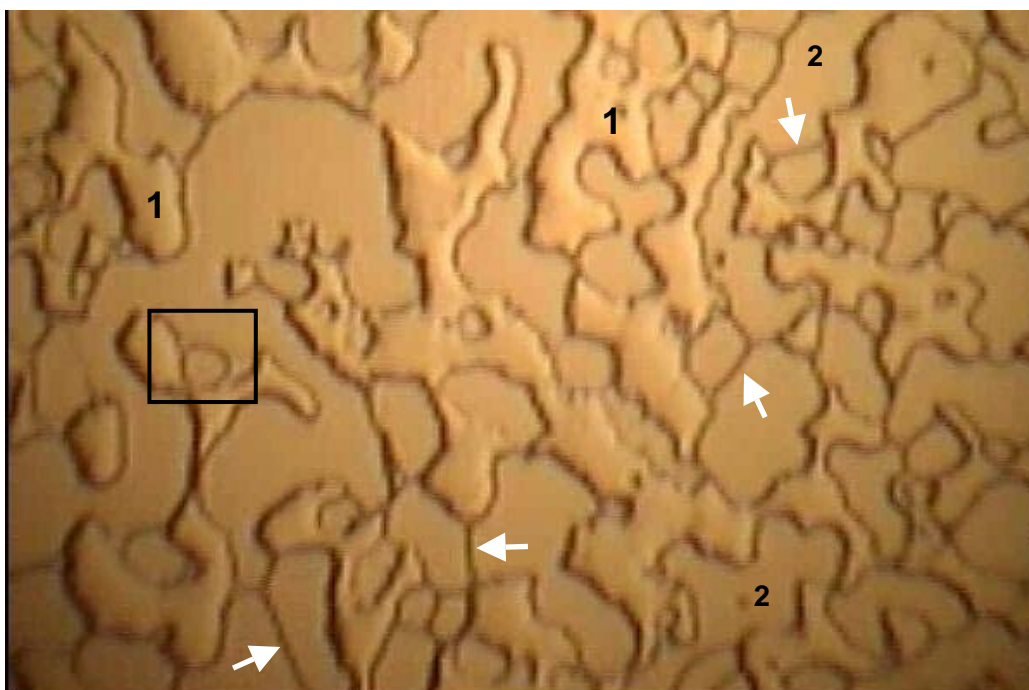
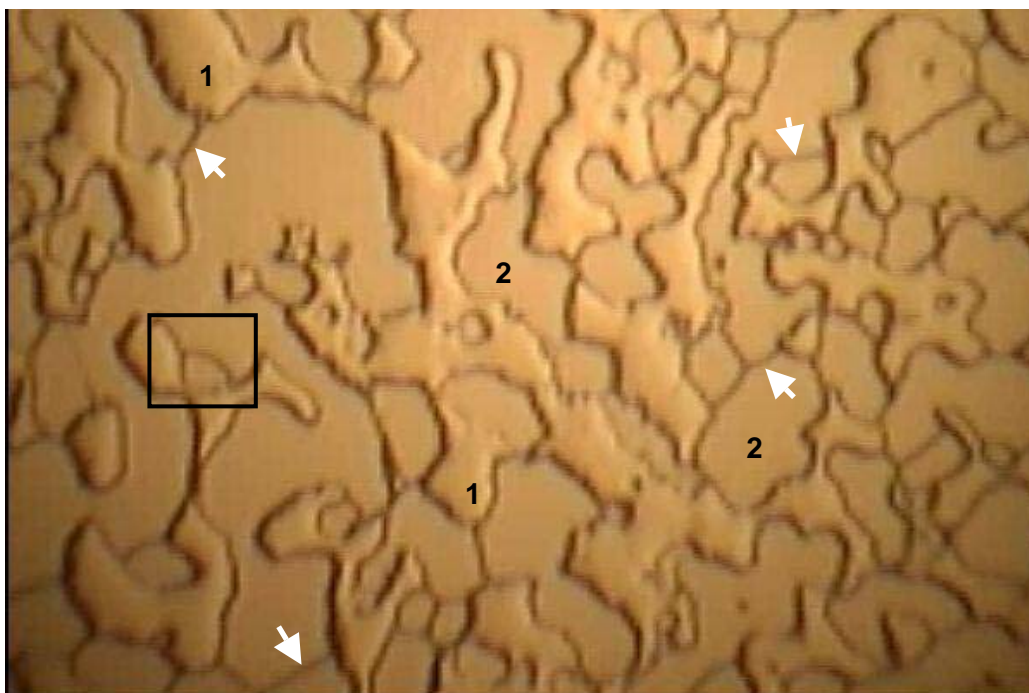


Рисунок 4. Фотоснимки пористой среды в масштабе пор, иллюстрирующие переход «сухой» пены во «влажную». Вверху – фотография пористой среды, насыщенной «сухой» пеной, внизу – «влажной» пеной. Рамкой выделена пленка «сухой» пены, которая превратилась в более толстую пленку «влажной» пены. Время между кадрами 15 с.

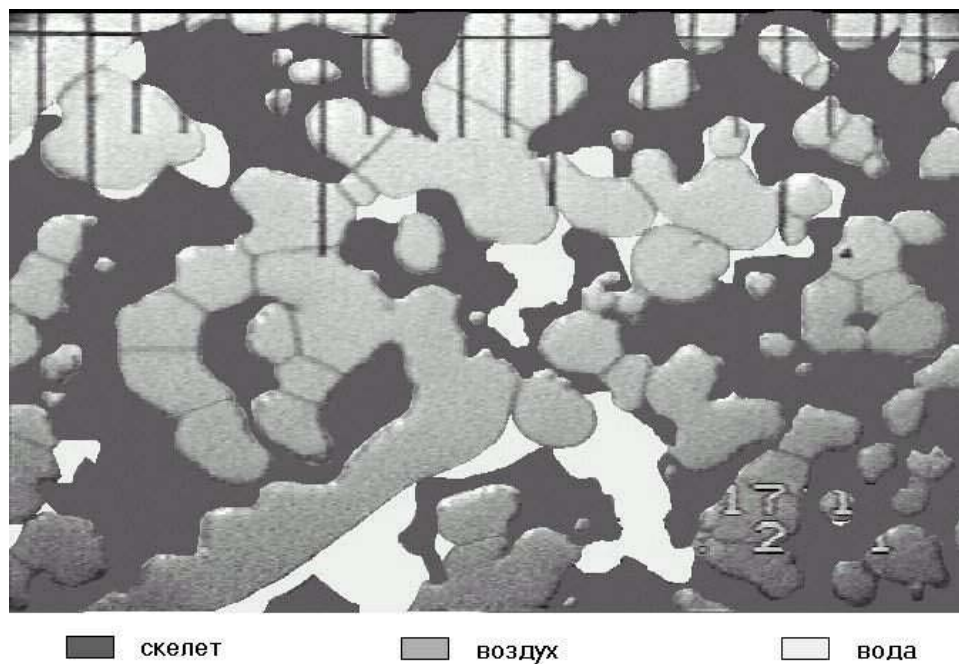


Рисунок 5. Разрушение пены при проникании воды в поровое пространство

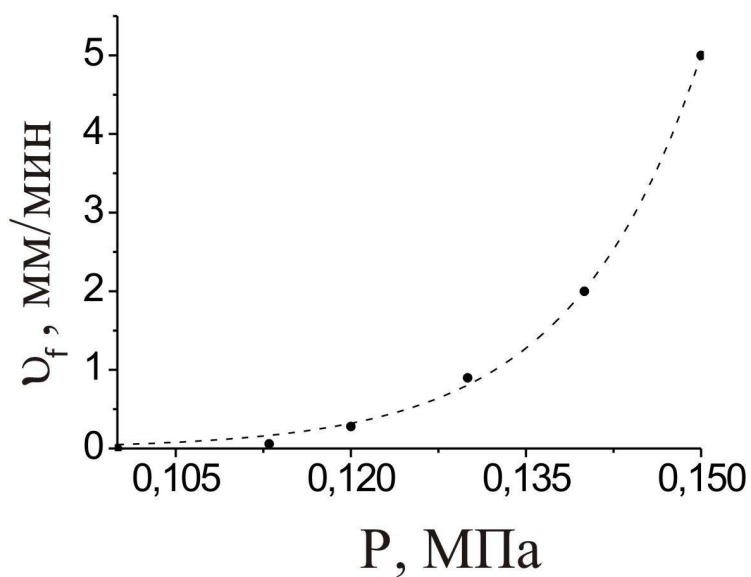


Рисунок 6. Зависимость скорости фронта проникания жидкости в пленки пены от давления на входе модели пористой среды

## 2.5 Влияние остаточной нефти на образование и течение пены в пористой среде

Исследовалось образование пены в пористой среде при наличии в ней остаточной нефти. Установлено, что интенсивность образования пены в этом случае зависит от способности поверхностно-активного вещества, входящего в пенообразующий раствор, диссоциировать на ионы в водном растворе. Поверхностно-активные вещества, способные образовывать ионы при растворении в воде, называются ионогенными, в противном случае – неионогенными. Обнаружено, что при закачке воздуха в пористую среду, насыщенную пенообразующим раствором ионогенных поверхностно-активных веществ, нефти. Установлено, что интенсивность образования пены в этом случае зависит от способности поверхностно-активного вещества, входящего в пенообразующий раствор, диссоциировать на ионы в водном растворе. Поверхностно-активные вещества, способные пена не образуется и остаточная нефть вытесняется газом только за счет эмульгирования при контакте с раствором поверхностно-активного вещества (рис. 7).

При использовании неионогенных поверхностно-активных веществ в пенообразующем растворе наблюдалось вспенивание пенообразующего раствора при закачке воздуха на вход модели (рис. 8). При этом происходил активный захват образующимися пленками пены мелких капелек нефти, в основном в каналы Плато и иногда в пленки пены. Обнаружено, что плотность пены, полученной с использованием неионогенного поверхностно-активного вещества, зависит от насыщенности остаточной нефти и уменьшается с ее ростом. Увеличение насыщенности остаточной нефти приводит к тому, что вспенивание прекращается.

Установлено, что в случае неионогенного ПАВ эффективность и скорость очистки пористой среды от остаточной нефти заметно выше, чем для случая ионогенного ПАВ. При увеличении перепада давления эффективность и скорость процесса очистки пористой среды от остаточной нефти увеличиваются.

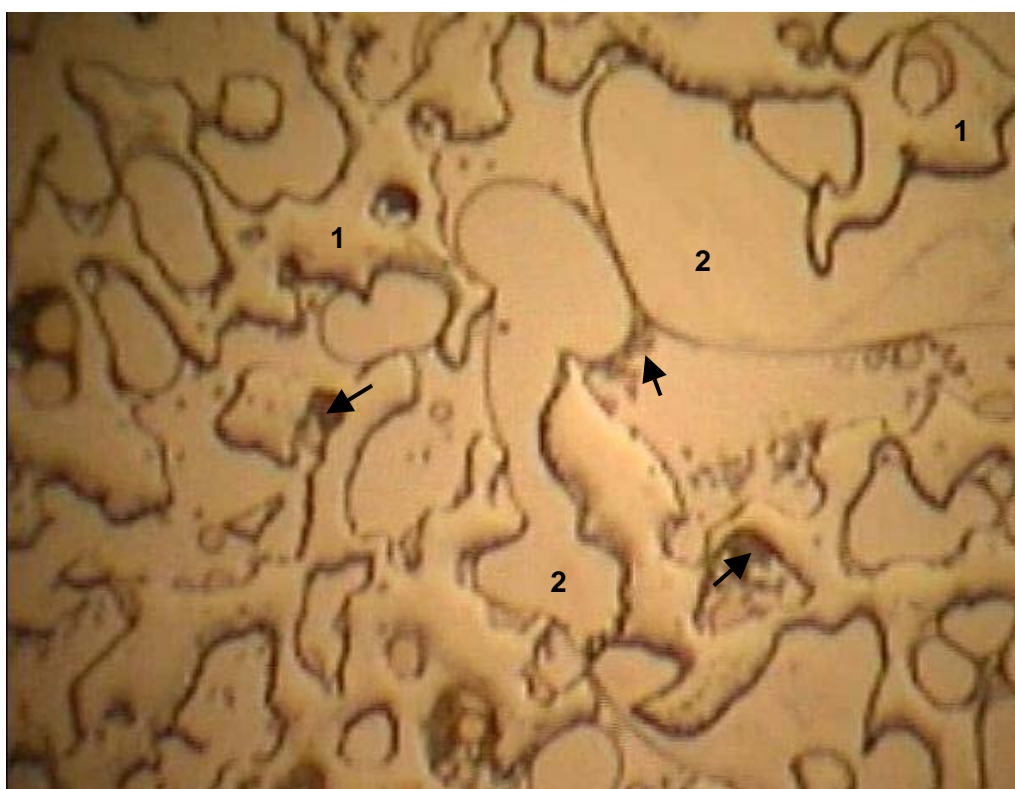
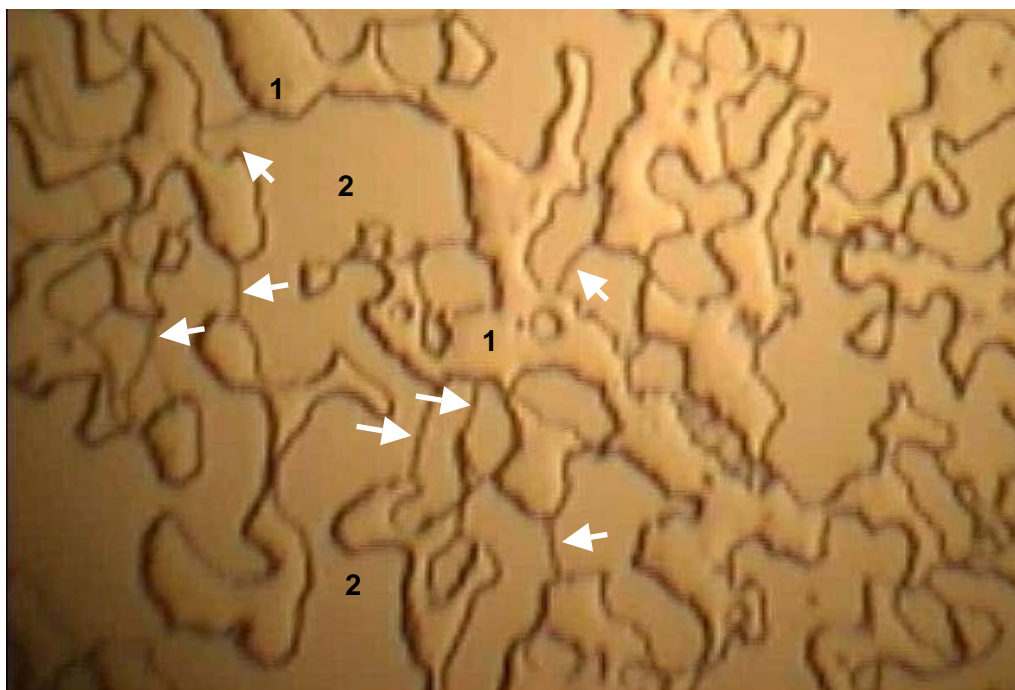


Рисунок 7. Вытеснение воздухом раствора ионогенного ПАВ (сульфонола) в пористой среде в отсутствие нефти (вверху) и в присутствии нефти (внизу). Черными стрелками (здесь и далее) показаны капли нефти.

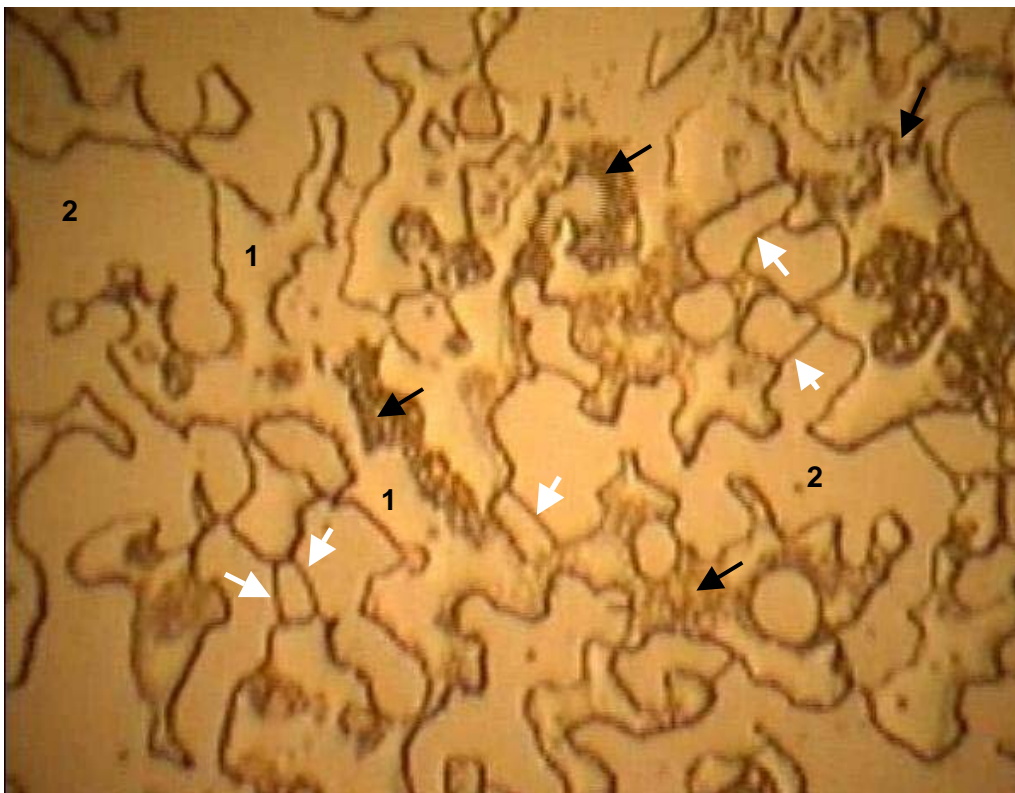
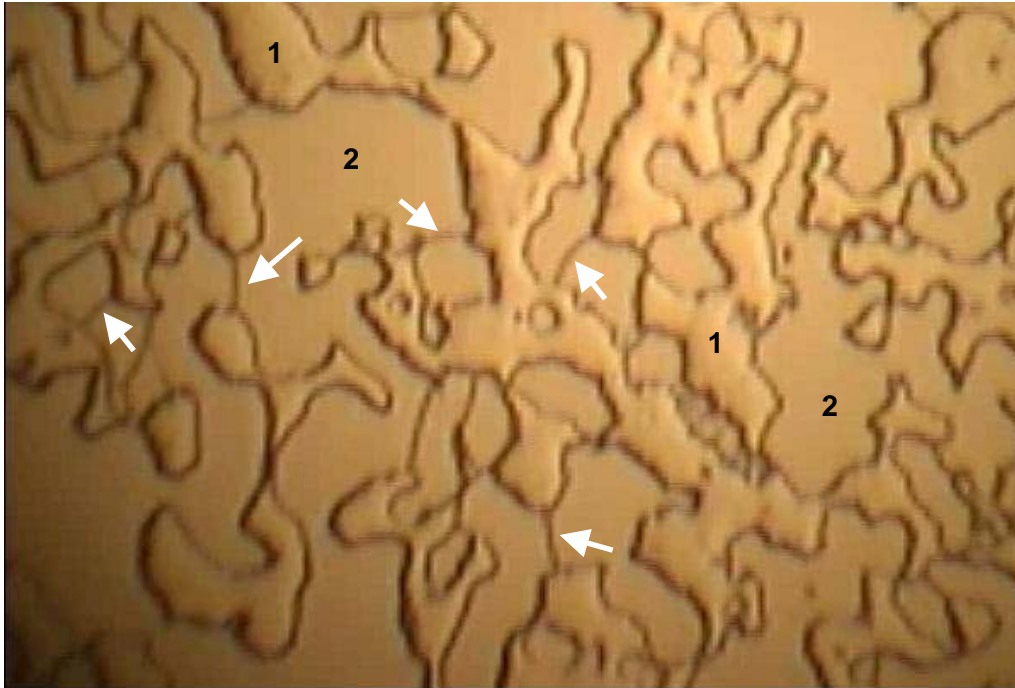


Рисунок 8. Формирование пены в пористой среде при последовательной закачке раствора неионогенного ПАВ (неонола) и воздуха в отсутствие нефти (вверху) и в присутствии нефти (внизу)

## Заключение

В работе получены следующие основные результаты:

1) Проведено экспериментальное исследование процессов трансформации «влажной» пены в «сухую» пену в двумерной модели пористой среды. Изучено два способа формирования «сухой» пены – быстрый и медленный, реализация которых зависит от значения перепада давления в пористой среде. При перепадах давления от 0,05 до 0,1 МПа в модели пористой среды наблюдается достаточно быстрое (от нескольких секунд до нескольких десятков секунд) образование «влажной пены» и затем на тех же временах ее превращение в «сухую» пену более высокой плотности. Этот процесс обеспечивается в основном механизмом гидродинамической неустойчивости течения при образовании пены.

Медленное образование «сухой» пены наблюдается в диапазоне перепадов давления пенообразования от 0,01 до 0,05 МПа. В этом случае переход от «влажного» состояния в «сухое» происходит при длительном (от нескольких часов до нескольких суток) уносе паров воды потоком газа (воздуха), диффундирующего через пленки пены.

2) Исследована возможность обратного перехода «сухой» пены во «влажную». Установлено, что переход «сухой» пены во «влажную» возможно осуществить закачкой пенообразующего раствора в пористую среду с пеной. Такой переход наблюдается только при медленном повышении входного давления в модели пористой среды. При достижении определенного перепада давления (немного выше перепада давления, при котором была создана пена) происходит проникание пенообразующего раствора в пленки «сухой» пены и превращение ее во «влажную» пену.

3) При закачке воды в пористую среду с пеной происходит разрушение пены с образованием пузырьковой жидкости. Если перепад давления не превышает перепад давления, при котором создавалась пена, то наблюдается фильтрация воды по пленкам пены. В результате происходит вынос из пленок раствора ПАВ, что приводит к постепенному, на длительных временах (несколько суток) разрушению пены. При превышении перепадом давления значения, соответствующего созданию данной пены, происходит быстрое проникновение

воды в пленки пены и она разрушается в течение времени от нескольких десятков секунд до нескольких минут.

4) Присутствие в пористой среде остаточной несмачивающей жидкости (нефти) существенно меняет картину пенообразования и движения пены. Поверхность пор становится гидрофобной, что значительно уменьшает способность пенообразующего раствора вспениваться. Для пенообразующего раствора на основе неионогенных ПАВ пена, созданная в присутствии нефти, получается в несколько раз менее плотной. Увеличение насыщенности остаточной нефти приводит к тому, что вспенивание прекращается. В экспериментах с использованием пенообразующего раствора на основе ионогенных ПАВ при наличии остаточной нефти пенообразование не наблюдалось.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-01-98003).

### Литература

1. Корнев К.Г. Пены в пористых средах. – М.: Физматлит, 2001. – 192 с.
2. Alexandrov A.V., Nguyen Q.P., Zitha P.L.J., Currie P.K. Network Modeling of Foam Flow in Porous Media // Proc. of 3th Euro Conference on Foams, Emulsions and Applications, 2000, Delft. P. 144 – 151.
3. de Gennes P.G. Revue De L'Institut Francais Du Petrole. // Marcel Deccer, 1992. V.47.
4. In Interfacial Phenomena in Petroleum Recovery. // Ed. by Chambers K.T., Radke C.J. and Morrow N.R Marcel Deccer, 1991. P. 191 – 255.
5. Owete O.S., Brigham V.E. SPE Res. Eng., 1987, 2(3). P. 315 – 323.
6. Ransohoff T.C., Radke C.J. SPE Res. Eng., 1988, 3(2). P. 573 – 585.
7. Rossen W.R. Foams in Enhanced Oil Recovery. // In books: Foams: Fundamentals and Applications. – Ed. by R.K. Prud'homme and S. Khan. – New York: Marcel Dekker, 1995. P. 256 – 274.