



УДК 532.694

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ПЕНЫ В ДВУМЕРНОЙ И ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛЯХ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

С. В. Амелькин, А. А. Губайдуллин, А. В. Шнайдер

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики СО РАН
Институт проблем повышения нефтеотдачи Тюменского государственного
нефтегазового университета, Тюмень

Аннотация. Проводится сопоставление результатов экспериментов по образованию и течению пены в двумерной стеклянной модели пористой среды и в трехмерном пористом образце горной породы.

Ключевые слова: пена в пористой среде, плотность пленок пены, режим течения пены, перепад давления

1 Введение

Для разработки практических приложений течения пены в пористой среде, связанных с методами повышения нефтеотдачи, представляет интерес исследование течения пены как в двухмерных, так и в трехмерных пористых средах. При этом особую важность приобретает проблема сопоставимости данных, полученных в экспериментах с двумерной пористой средой, с данными экспериментов с трехмерной пористой средой. Нахождение общих закономерностей в поведении пены в двух- и трехмерном случаях позволит более грамотно подходить к разработке методов использования пены для повышения нефтеотдачи.

2 Экспериментальные методы

Схема и описание экспериментальной установки для исследования формирования и течения пены на базе прозрачной плоской модели пористой среды приведена в работе [1]. Пористый слой модели изготовлен на стеклянной



Рис. 1. Схема прозрачной плоской модели пористой среды. Размеры модели 40×20 мм, глубина пор 15 мкм, диаметр входного и выходного отверстия 2 мм. Наблюдаемая под микроскопом область 1×0.8 мм (показана прямоугольником)

ной пластине фотолитографией аншлифа натурального образца нефтеносной породы. Схематическое изображение пористой части модели показано на Рис. 1, где указан (в масштабе) участок модели, наблюдаемый в микроскоп со 100-кратным увеличением.

На аналогичной установке проводилось исследование формирования и течения пены в объемных пористых средах (экстрагированных песчаных кернах нефтеносной породы).

Для анализа особенностей процесса фильтрации пены с помощью высокочувствительных электронных весов регистрировалась зависимость расхода флюидов (раствора поверхностно-активного вещества (ПАВ) и воздуха) от перепада давления.

В качестве пенообразующего раствора в экспериментах использовался 0.5% и раствор сульфанола (ионогенный ПАВ) в дистиллированной воде, насыщенной газом при нормальных условиях.

Исследование формирования и течения пены при последовательном насыщении пористой среды раствором ПАВ в дистиллированной воде и газом (воздухом) проводилось в три этапа. На первом этапе через пористую среду прокачивался раствор ПАВ в количестве 10 поровых объемов. На втором этапе на вход модели или пористого образца подавался воздух при давлении P_g , так что создавался постоянный перепад давления между входом и выходом $\Delta P = P_g - P_{\text{атм}}$. При этом в случае прозрачной модели визуально исследовался процесс образования пены: скорость и вид фронта вытеснения раствора ПАВ газом, свойства полученной пены, ее текстура и поведение в процессе генерации. На третьем этапе после заполнения пористой среды пеной исследовалась устойчивость пены при повышении давления газа на входе модели и скорость фильтрации (зависимость расхода пены от времени при заданном перепаде давления).

3 Пена в модели пористой среды

Обнаружено, что в плоской модели пористой среды пленки пены формируются первоначально в результате соприкосновения «вязких пальцев» [2] газа: за продвигающимися менисками жидкости образуются ориентированные по потоку устойчивые линзы раствора ПАВ, которые затем трансформируются в пленки пены. Соответствующий механизм формирования пленок пены в масштабе пор известен в литературе как «leave-behind» (механизм соприкосновения [3, 4]). Эти пленки пены не могут блокировать течение газа, так что проницаемость газа в пористой среде уменьшается незначительно, по нашим данным, в несколько раз.

С увеличением градиента давления в пористой среде наблюдаются два других механизма генерации пленок пены — капиллярно-гидродинамическая неустойчивость («snap-off») и размножение пленок пены на разветвлениях транспортных каналов («T-division»), которые начинают вносить основной вклад в формирование пены. В данном случае пленки пены ориентированы, как правило, поперек потока и именно они отвечают за блокирование течения газа в насыщенной пеной пористой среде.

После достижения «вязкими пальцами» газа выхода модели и формирования пены в пористой среде изучались свойства пены, скорость фильтрации и режимы течения. В качестве основного параметра, характеризующего свойства пены в модели пористой среды, принято значение числа пленок на единицу площади модели — плотность пленок пены ρ .

Установлено, что величина плотности пленок пены ρ существенно зависит от перепада давления, при котором образуется пена. С увеличением перепада давления значение ρ возрастает (Рис. 2). Пена, полученная при величине $\Delta P > 0.05$ МПа, имеет полиэдрическую структуру в порах и размеры ячеек меньше размера пор, так что ее свойства приближаются к свойствам объемной пены.

Основные результаты изучения режимов течения пены в модели состоят в следующем. Установлено, что в области значений перепада давления до 0.1 МПа при длине пористого участка модели 40 мм имеет место блокирование течения образовавшейся пеной, которое проявляется как постепенное падение скорости фильтрации пены вплоть до полной остановки фильтрационного процесса (Рис. 3(A)). При этом формируется пена с такой плотностью пленок и их распределением в поровом пространстве, что перепад давления, необходимый для начала ее сдвижения, соответствует приложенному перепаду давления. Если давление на входе модели возрастало, пена приходила в замедляющееся движение до установления нового значения давления сопротивления начальному сдвигу (Рис. 3(B)). Данный «блокирующий» режим течения наблюдался до значений $\Delta P < 0.1$ МПа. При дальнейшем увеличении давления на входе модели наблюдался пери-

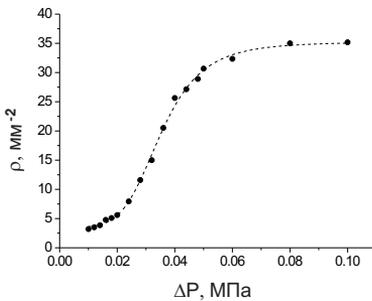


Рис. 2. Зависимость плотности пены от приложенного перепада давления

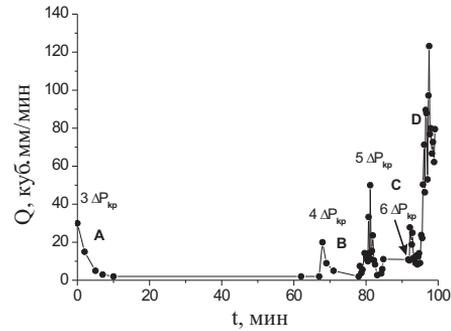


Рис. 3. Зависимость расхода пены, полученной в модели пористой среды при $\Delta P = 0.03$ МПа, от времени при различных значениях действующего перепада давления; $\Delta P_{кр} = 0.01$ МПа — минимальный перепад давления, при котором начинается вытеснение воздухом раствора ПАВ

одический (режим течения с прорывом газом, Рис. 3(C)), а затем и постоянный прорыв газа через пену в пористой среде (Рис. 3(D)).

4 Пена в пористом образце горной породы

В экспериментах по изучению образования и движения пены в трехмерном пористом образце обнаружено, что расход флюида с ростом перепада давления между входом и выходом пористого образца меняется подобно тому, как наблюдалось в случае с моделью пористой среды. При перепадах давления от $\Delta P = 0.1$ МПа до $\Delta P = 0.2$ МПа наблюдается «блокирующий» режим течения пены (Рис. 4(A)). При более высоких перепадах давления $\Delta P > 0.2$ МПа движущаяся пена, как видно по графику расхода (Рис. 4(B)), начинает периодически прорываться воздухом. При $\Delta P > 0.7$ МПа течение воздуха через пену становится непрерывным и расход резко возрастает (Рис. 4(C)).

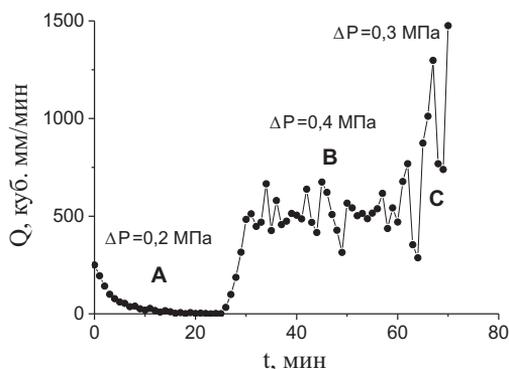


Рис. 4. Зависимость расхода пены, полученной в трехмерном пористом образце горной породы при перепаде давления $\Delta P = 3\Delta P_{кр} = 0,05$ МПа, от времени при различных значениях действующего перепада давления

5 Заключение

В работе обнаружено, что процессы образования и течения пены в двумерной и трехмерной пористых средах качественно совпадают. При малых перепадах давления наблюдается постепенное блокирование фильтрации пеной. При более высоких перепадах давления наблюдается периодический прорыв пены газом, который становится непрерывным при дальнейшем повышении перепада давления.

Список литературы

- [1] Ахметов А. Т., Амелкин С. В., Шнайдер А. В. Динамика деструкции пены в пористой среде // Изв. ВУЗов. Нефть и газ. 2004. № 1. С. 19–23.
- [2] Homsy G. M. Viscous fingering in porous media // Ann. Rev. Fluid Mech. 1981. V. 19 Pp. 271–280.
- [3] Корнев К. Г. Пены в пористых средах. М.: Физматлит, 2001. 192 с.
- [4] De Gennes P. G. Conjectures on foam mobilization // Revue De L'Institut Francais Du Petrole. Marcel Deccer, 1992. V. 47, № 2. Pp. 249–254.