

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 532.546.3 + 536.717

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ
В ПОРИСТЫХ ПЛАСТАХ

© 2012 г. В. М. Зайченко, И. Л. Майков, А. К. Смолкин, Г. Ф. Сокол, В. М. Торчинский

Объединенный институт высоких температур РАН

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2

Поступила в редакцию 16.11.2011 г.

Предложена методика моделирования двухфазного течения трехкомпонентной углеводородной смеси газов (например, газоконденсата смеси метан-пропан-бутан) в пористом пласте с использованием тензометрических датчиков давления. Представлены результаты экспериментальных исследований процессов фильтрации двухфазной углеводородной смеси метан-пропан-бутан через пористую среду в близких к реальным условиям на установке “Пласт” ОИВТ РАН. Показана возможность определения координаты области образования газоконденсатной пробки в трубе с точностью до 10% от длины экспериментального участка.

1. ВВЕДЕНИЕ

Газовый конденсат представляет собой сложную смесь метана и высших производных метанового ряда с высоким содержанием метана (более 0.7 мольных долей) [1].

Фазовая диаграмма такой смеси содержит так называемую “ретроградную область”, т.е. область, в которой при понижении давления возможно образование ретроградной жидкости, испаряющейся с дальнейшим уменьшением давления. В типичных газоконденсатных месторождениях начальное пластовое давление P_1 (рис. 1) велико, и система находится в газообразном (закритическом) состоянии.

Распределение давления по поровому пространству вблизи скважины показано схематически на рис. 1 [2].

При способе добычи газового конденсата “на истощение” давление P_2 на забое скважины соответствует двухфазному состоянию газоконденсатной смеси. При фильтрации углеводородов в пористой среде давление смеси меняется непрерывно, проходит через давление фазового перехода P_{ph} , при котором происходит выпадение жидкой фазы. Газоконденсатная смесь частично конденсируется с образованием ретроградной жидкости, которая в процессе фильтрации заполняет поры, образуя жидкостную пробку, что препятствует выходу газовой фазы. Математическая модель образования газоконденсатной пробки реализована в программе PLAST и представлена в работе [2].

В данной работе представлены результаты моделирования процессов образования газоконденсатной пробки и описана методика тензометрических измерений, позволяющая определить место-

нахождение пробки в экспериментальном участке установки.

При проведении модельных измерений мы использовали смеси газов метан-пропан-бутан различного состава.

Выбор этой смеси определялся рядом факторов [3]:

- наличие достаточно широкой ретроградной области фазовой диаграммы (рис. 2) для обеспечения заметного количества конденсата;
- не слишком высокие давления (до 15 МПа);
- легко реализуемый в эксперименте диапазон температур (от 300 до 400 К);
- доступность компонентов смеси.

В качестве модельной была выбрана смесь метан-пропан-бутан (массовая концентрация метана не превышала 60%). При этом давление начала

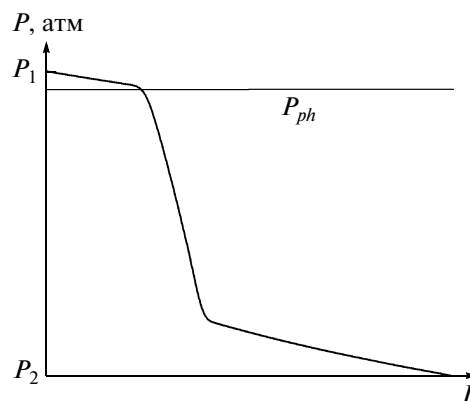


Рис. 1. Распределение давления по поровому пространству вблизи скважины.

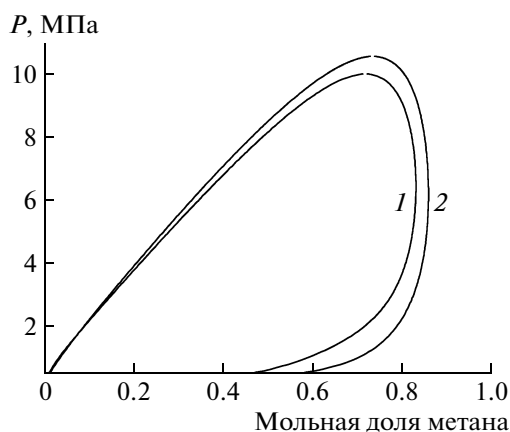


Рис. 2. Фазовые диаграммы давление—состав трехкомпонентной смеси метан-пропан-бутан: 1 – 80% метан, 10% пропан, 10% бутан; 2 – 80% метан, 15% пропан, 5% бутан (температура – 10°C).

конденсации составляет немногим больше 10 МПа и смесь в двухфазном состоянии находится в ретроградной области.

2. МОДЕЛЬ ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО ПЛАСТА

2.1. Экспериментальный стенд

Моделирование образования газоконденсатной пробки и исследование места ее образования проводилось на установке, созданной в ОИВТ РАН на базе стенда “Пласт” [3]. Стенд предназначен для исследования процессов фильтрации пластовых флюидов при термобарических условиях реальных пластов. Параметры установки: давление до 40 МПа, температура до 400 К, что позволяет в широких пределах моделировать пластовые условия и проводить эксперименты с жидкостями и газами различного фракционного состава.

2.2. Экспериментальная установка

Блок-схема экспериментальной установки “Пласт” для исследования фильтрационных характеристик и процессов вытеснения углеводородов при различных методах физико-химического воздействия представлена на рис. 3.

В качестве одномерной модели пласта использовали термостатированную стальную трубу. Длина трубы 3 м, внутренний диаметр 8 мм, толщина стенок 1 мм. Труба изготовлена из нержавеющей стали Х18Н10Т и заполнена предварительно промытым кварцевым песком фракции 0.09–0.125 мм. Коэффициент проницаемости слоя составлял по нашим измерениям $2.3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$.

Оборудование стенда позволяет моделировать процессы вытеснения нефтяных и газоконденсатных смесей из пласта газовыми средами и во-

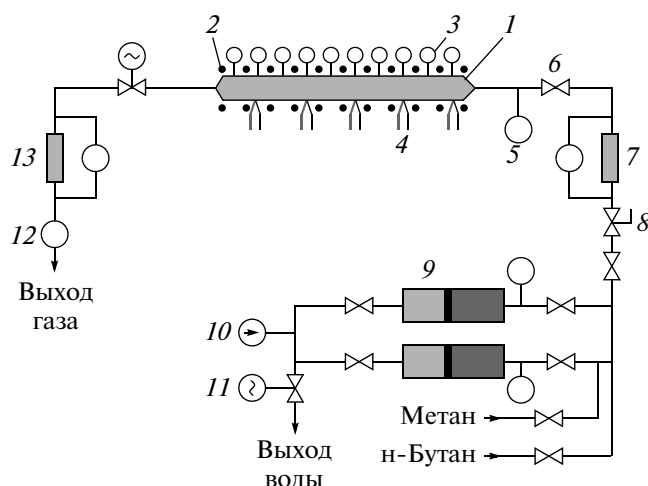


Рис. 3. Блок-схема стенда “Пласт”. 1 – экспериментальный участок; 2 – нагреватель; 3 – тензодатчики; 4 – термопары; 5 – датчики давления; 6 – вентиль; 7 – расходомер; 8 – редуктор; 9 – разделительный цилиндр; 10 – насос-дозатор; 11 – вентиль с электроприводом; 12 – газовый счетчик; 13 – расходомер.

дьяным паром, а также моделировать тепловые и механические (волновые) методы воздействия и исследовать поведение углеводородных смесей и коллектора при введении химически активных компонентов.

2.3. Методика измерения параметров эксперимента

Смесь метан-пропан-бутан готовили в разделительном цилиндре высокого давления при давлении 13 МПа. Температуру термостатирования изменяли в диапазоне 290–350 К. Эти параметры обеспечивают нахождение смеси в ретроградной области фазовой диаграммы при проведении эксперимента. После заполнения экспериментального участка (э.у.) смесью при давлении 12 МПа мы открывали кран на выходе и в течение всего эксперимента поддерживали постоянным перепад давления ΔP на э.у. В ходе эксперимента измеряли расход газовой фазы на выходе из э.у., температуру входящей и выходящей смеси, поле температур в термостате и давление в магистралях установки.

Кроме того, мы проводили отбор проб на хроматографический анализ состава исходной смеси и состава смеси на выходе из э.у. в течение эксперимента. Для обработки и визуализации данных была разработана специальная программа, с помощью которой измеряемые параметры выводились на мнемосхему и записывались в соответствующий файл.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОКОНДЕНСАТНОЙ ПРОБКИ

В экспериментах по моделированию процесса фильтрации газоконденсатной смеси на смеси метан-пропан-бутан исходное давление составляло 12 МПа, что соответствует закритической области фазовой диаграммы модельной смеси для всех исследованных массовых концентраций (45–60% метана) и температур 290–350 К. Перепад давления P на э.у. составлял в различных экспериментах от 3 до 8 МПа.

В результате проведенных экспериментов установлено, что газоконденсатная пробка при исходной массовой концентрации метана $>60\%$ в исследованном диапазоне температур и давлений не образуется.

Также не происходит образования пробки при массовой концентрации метана 45% и $T = 340$ К.

При проведении опытов в условиях, соответствующих ретроградной области фазовой диаграммы (концентрация метана 43–50%, температура смеси до 310 К), нам удалось зафиксировать образование конденсатной пробки по резкому уменьшению расхода в моменты времени, зависящие от перепада давления на э.у.

4. ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КОНДЕНСАТНОЙ ПРОБКИ

Для наиболее полного описания эксперимента необходима информация о месте возникновения газоконденсатной пробки в поровом пространстве внутри э.у. Эндоскопические методы в данном случае не осуществимы или трудно реализуемы вследствие того, что:

- э.у. представляет собой толстостенную трубку ($h = 1$ мм) из стали, заполненную кварцевым песком;

- изменение плотности системы кварцевый песок–жидкость при фазовых переходах составляет менее 5%, что находится на грани чувствительности рентгенографического метода измерений и метода, использующего радиоактивное излучение (эти методы требуют повышенных мер безопасности);

- в данных условиях невозможно применить ультразвуковой метод исследования.

По виду кривой изменения давления при образовании конденсатной пробки (рис. 1), воспользовавшись результатами расчетов [2], можно определить место расположения пробки. Ее головную часть можно определить по резкому увеличению градиента давления по результатам измерений распределения давления вдоль э.у.

Для проведения измерений были использованы одиночные фольговые тензорезисторы фирмы

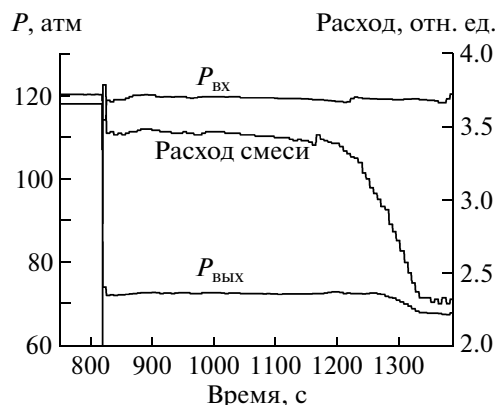


Рис. 4. Изменение расхода смеси и входного и выходного давлений от времени.

HBM (Германия) со следующими характеристиками: сопротивление $350 \text{ Ом} \pm 0.6\%$; К-фактор $= 2.105 \pm 0.5\%$.

Датчики были соединены по полумостовой схеме и подключены к усилителю Spider-8. Сигналы выводились на компьютер и обрабатывались программой HBM Catman 5.0 Release 3 [Interactive]. 10 пар тензодатчиков были равномерно размещены по длине э.у.

4.1. Эксперименты по отработке методики тензометрических измерений

При отработке методики тензометрических измерений в качестве модельного газа использовали газообразный азот. В этом случае при движении газа через пористую среду вдоль э.у. распределение давления по трубе должно следовать линейному закону. Задачей экспериментов было проследить за отклонением от него. Погрешность тензометрических измерений давления в данном эксперименте не превышала 1%.

Как показали измерения, распределение давления внутри э.у. следует линейному закону. Отклонение от линейной функции не превышало 0.1–0.2 МПа, что находится в пределах допустимой ошибки эксперимента.

4.2. Эксперимент по определению места образования газоконденсатной пробки

Был проведен ряд экспериментов по определению места образования газоконденсатной пробки. Параметры эксперимента были следующими: давление на входе в э.у. составляло 12 МПа, на выходе 7 МПа, т.е. перепад давлений составлял 5 МПа (рис. 4); модельная смесь – метан-пропан-бутан с молярной концентрацией метана 80%, пропана 15% и бутана 5%.

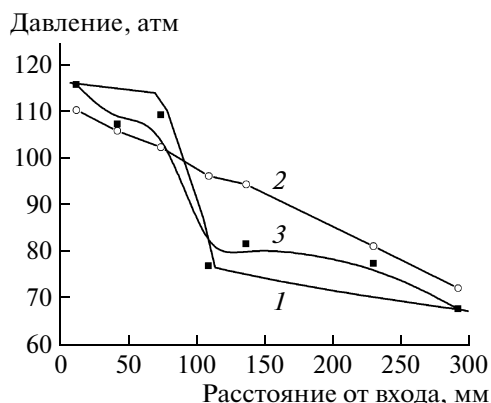


Рис. 5. Распределение давления по длине э.у. 1 – результаты математического моделирования [2]; 2 – распределение давления на 821-й секунде, 3 – на 1381-й.

Распределение давления внутри э.у. в зависимости от времени эксперимента представлено на рис. 5.

На 821-й секунде модельная смесь находится в однофазном состоянии и распределение давления по э.у. линейно (рис. 5). На 1381-й секунде эксперимента распределение давления по э.у. нелинейно, а максимальный градиент давления наблюдается на расстоянии 75–110 см от начала э.у., что свидетельствует об образовании газоконденсатной пробки в данном месте.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты рассмотрения особенности фильтрации модельной газоконденсатной жидкости (метан-пропан-бутан) в объеме пористого пласта. Предложена методика определения времени и места возникновения газоконденсатной пробки по резкому увеличению градиента давления. Описана методика тензометрического измерения распределения давления по длине э.у. Проведенные эксперименты по исследованию течения двухфазной трехкомпонентной углеводородной модельной смеси метан-пропан-бутан показали возможность определения места образования газоконденсатной пробки с точностью 10% от длины участка.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-08-00595-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вяхирев Р.И., Гриценко А.И., Тер-Саркисов Р.М. Разработка и эксплуатация газовых месторождений. М.: Недра, 2002.
2. Директор Л.Б., Качалов В.В., Майков И.Л., Сквородько С.Н. Препринт ОИВТ РАН № 2– 441. М., 2000.
3. Зайченко В.М., Майков И.Л., Торчинский В.М., Шпильрайн Э.Э. // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 5. С. 701.