

ФИЛЬТРАЦИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ, СОПРОВОЖДАЕМАЯ ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ

Н.А. Барышников, С.Б. Турунтаев, С.В. Елисеев¹

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

Одной из перспективных технологий разработки кероген содержащих пород Баженовской свиты является термогазовый метод воздействия на пласт. Предполагается, что в процессе подобного воздействия может формироваться область пиролиза керогена, продвигающаяся в направлении фильтрационного потока. При пиролизе будет происходить увеличение пористости. В качестве аналога такого процесса, с гидродинамической точки зрения, может рассматриваться плавление

ние части вещества, формирующего матрицу проницаемых пород, при разогреве фильтрационным потоком, имеющим высокую температуру. В статье представлено экспериментальное исследование динамики продвижения фронта плавления части вещества скелета при фильтрации через него разогретой вязкой жидкости. Описан процесс формирования и продвижения фронта плавления в виде проплавленных каналов. Описано явление формирования оторочки из расплавленного вещества на фронте плавления.

Введение

В настоящее время одно из главных направлений развития нефтедобычи в России связано с освоением запасов Баженовской свиты. Баженовская свита представляет собой нетрадиционный коллектор, отличающийся высокой нефтенасыщенностью, в котором углеводороды могут встречаться как в сланцевых, так и высокопродуктивных линзах. При этом, основной потенциал баженовской свиты связан преимущественно с керогеном, содержащемся в нефтяных сланцах [Сонич, 2001]. Согласно экспериментальным исследованиям [Martins, 2010; Slumberger, 2011], извлечение углеводородов из керогена возможно под воздействием температур выше 400 градусов Цельсия. Поэтому одной из технологий, предлагаемых сегодня, является термогазовый метод воздействия [Кокорев, 2010]. Суть метода состоит в закачке воздуха в пласт и трансформации его в эффективные вытесняющие агенты за счет внутрипластовых окислительных и термодинамических процессов. При этом возникают некоторые специфические проблемы моделирования подземной гидродинамики. Для оптимизации технологического воздействия необходимо знать, как в пласте происходят процессы взаимодействия разогретых агентов и слагающих пласты углеводородных фаз. Эти процессы носят достаточно сложный и многоступенчатый характер. Предполагается, что при закачке воздушной смеси в трещиноватых пропластках продвигается зона генерации тепла, разогревающая окружающие слои нефтематеринской породы и кероген. Одновременно с продвижением фронта разогрева происходит фильтрация вытесняющих агентов и извлечённых из керогена углеводородов. При этом при прохождении фронта разогрева должно происходить изменение фильтрационных свойств коллектора за счёт увеличения его проницаемости. Это может привести к повышенному притоку воздушной смеси, локальному ускорению процесса разложения керогена и потери устойчивости фронта разогрева.

Цель представленной работы состояла в экспериментальном исследовании динамики продвижения фронта плавления части твёрдого вещества пористого скелета при фильтрации через него разогретой вязкой жидкости. В ходе работы была поставлена серия опытов по внедрению вязкой разогретой жидкости в модель пористого коллектора, содержащую легкоплавкую твердую фазу, изучалась структура фронта, влияние скоростей фильтрации и доли легкоплавкой твёрдой фазы на его структуру и устойчивость.

Эксперимент

Экспериментальная работа проводилась на оригинальной установке (рис. 1). В качестве пористого массива (5) использовался тонкий слой пористого вещества (сте-

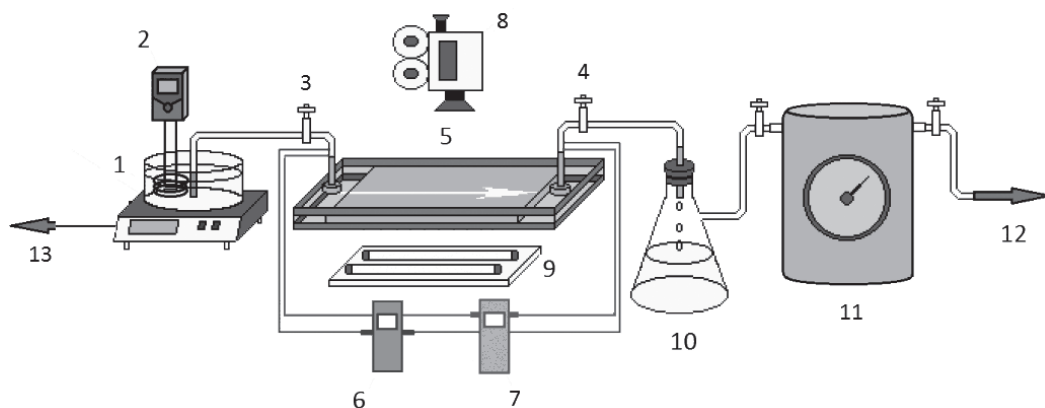


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

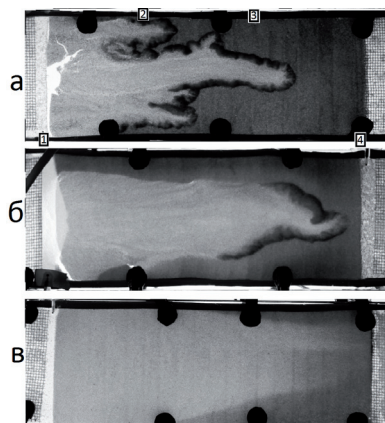
1 – весы с термостатированной кюветой с закачиваемой жидкостью; 2 – нагревательный элемент; 3, 4 – вентиль; 5 – модель пористого массива; 6 – дифференциальный манометр; 7 – регистратор температуры; 8 – регистрирующая фотоаппаратура; 9 – лампа подсветки; 10 – емкость для сбора жидкости; 11 – буферная емкость для создания разрежения; 12 – вакуумный насос; 13 – компьютер

клянных шариков), зажатый между двумя параллельными теплоизолированными стеклянными пластинами, определенная доля порового пространства которого была заполнена парафином. Пористость массива без парафина составляла 0,4, проницаемость в различных опытах варьировалась в пределах от 20 до 50 Дарси. Полученная модель пористой среды была оптически прозрачна, что позволило при помощи фотоаппаратуры (8) и подсветки (9) регистрировать картину продвижения фронта плавления на различных масштабах. В качестве вытесняющего агента была использована вода, температура которой поддерживалась на уровне большем, чем температура плавления парафина. Распределение температур вдоль направления фильтрационного потока изучалось при помощи четырёх термпар, расположенных на равных расстояниях вдоль края модельного пористого массива. Нагнетание разогретой воды происходило при фиксированных перепадах давления, создаваемых при помощи вакуумного насоса (12), подключённого через буферную ёмкость (11) к стоку порового массива. В процессе нагнетания разогретой жидкости непрерывно производилась фотосъёмка модельного массива, измерялась масса и объёмный расход закачиваемой жидкости.

Перед началом каждого опыта массив заполнялся водой комнатной температуры. В процессе заполнения производилось измерение его фактической пористости и проницаемости. По окончании заполнения производился нагрев воды в термостатированной кювете (1) до температуры 95 градусов Цельсия, после чего вода подавалась в модельный пористый массив. Под воздействием высокой температуры парафин, содержащийся в поровом пространстве массива, начинал плавиться. При этом формировался неустойчивый фронт плавления, продвигающийся вдоль направления фильтрационного потока в виде проплавленных каналов (рис. 2). При этом часть расплавленного парафина оставалась за фронтом плавления в виде расплава, содержащегося внутри пор. По мере продвижения фронта регистрировалось изменение координаты фронта со временем и изменение температуры воды в четырёх точках на равном расстоянии вдоль направления фильтрационного потока. В ходе опытов было обнаружено, что на фронте плавления

Рис. 2. Фронт плавления в опытах с различным содержанием парафина в порах: а) фронт плавления с оторочкой, доля парафина 0,5; б) фронт плавления с частичной оторочкой, доля парафина 0,3; в) фронт плавления без оторочки, доля парафина 0,2.

Цифрами на рис. 2, а показано расположение термопар



формируется зона повышенной концентрации расплавленного парафина, вытесняемого разогретой водой. По мере продвижения фронта, ширина этой зоны увеличивается. Установлено, что оторочки расплава парафина перед фронтом возникают в опытах, когда парафин изначально занимает более 30% начального порового пространства массива (рис. 2). Оторочки оказывают некоторое стабилизирующее влияние на неустойчивый фронт.

На рис. 3 представлен график зависимости температуры массива от времени в четырех различных точках. В ходе опытов было установлено, что температура воды на фронте плавления составляет 50 градусов Цельсия, что соответствует температуре плавления парафина. На графике изменения температуры со временем (рис. 3) перелом кривой T_2 на 120 секунде соответствует пересечению датчика температуры фронтом плавления.

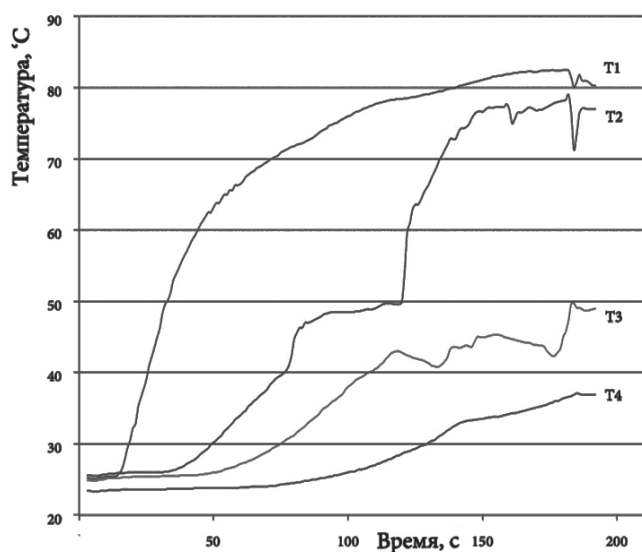


Рис. 3. График зависимости температуры от времени, измеренной на термопарах 1–4 на равных расстояниях от входа вдоль боковой стенки пористого массива

Обсуждение результатов экспериментов

Для описания динамики продвижения фронта плавления была рассмотрена модель конвективного переноса тепла в плоском пористом массиве, зажато между двумя водонепроницаемыми пластинами. Температура пористой среды и жидкости считаются равными. Уравнение баланса тепла может быть записано в виде:

$$-\rho_v C_v U \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = \rho_{cp} C_{cp} (1 - m) \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} + \frac{2\lambda}{b\delta} (T(x, t) - T_0) \quad (1),$$

где ρ_v и C_v – плотность и удельная теплоёмкость воды; ρ_{cp} и C_{cp} – плотность и удельная теплоёмкость пористой среды; λ – коэффициент теплопроводности пластин, δ – толщина пластин; b – толщина пористого массива, m – пористость массива; U – скорость фильтрации воды, $T(x, t)$ – температура воды; T_0 – температура снаружи непроницаемых пластин. В начальный момент времени температуры массива и жидкости равны. Температура жидкости на входе в массив меняется со временем как $T_1(t)$. Если пренебречь потерями тепла за счёт теплопроводности через стенки массива, то, решая полученное уравнение методом характеристик, можно найти зависимость координаты $X(T)$ температурного фронта с заданной постоянной температурой T от времени:

$$X(T) = \frac{\rho_v C_v}{\rho_{cp} C_{cp}} \frac{1}{1 - m} \frac{1}{S} (V(t) - V_0(T)), \quad (2),$$

где $V_0(T)$ – это объем воды, прошедший через пористый массив до момента времени, когда температура на входе T_1 стала равна T . Таким образом, координата фронта $X(T)$ с заданной температурой T линейно зависит от суммарного объема воды $V(t)$,

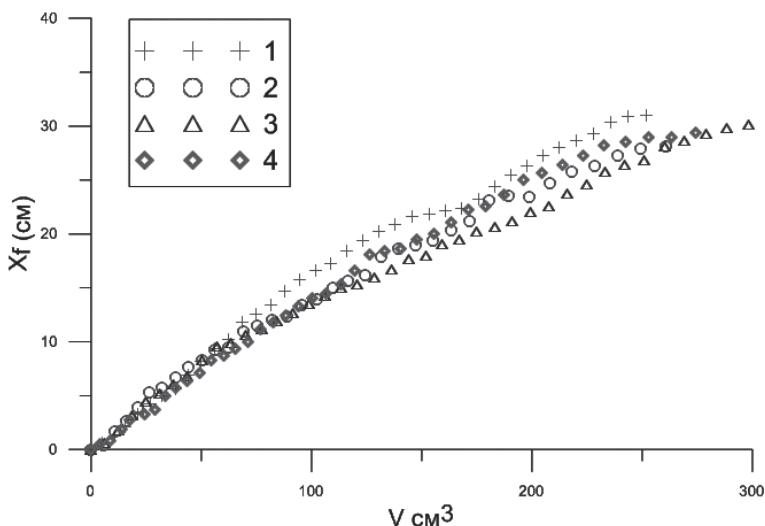


Рис. 4. Зависимость координаты конца первого проплавленного «пальца» от суммарного объема жидкости для четырех опытов с различным начальным содержанием парафина в порах σ и перепадом давления, при котором производилась прокачка ΔP : 1 – $\sigma = 0,4$ и $\Delta P = 480$ мБар; 2 – $\sigma = 0,4$ и $\Delta P = 300$ мБар; 3 – $\sigma = 0,3$ и $\Delta P = 300$ мБар; 4 – $\sigma = 0,2$ и $\Delta P = 260$ мБар

прошедшей через пористый массив. Как отмечалось ранее, в проведённых опытах температура жидкости на фронте плавления была постоянна и равна температуре плавления парафина. Если бы фронт плавления был устойчив, можно было ожидать, что, в соответствии с (2), координата фронта плавления будет пропорционально суммарному объёму жидкости, прошедшему через массив. Опыты показали, что фронт плавления продвигается в виде «пальцев», тем не менее, для опытов с различным начальным содержанием парафина в порах и объёмными расходами жидкости, зависимость координаты X_f конца первого проплавленного «пальца» от суммарного объёма жидкости V близка к линейной (рис. 4). При этом коэффициент пропорциональности из соотношения (2), вычисленный исходя из свойств материалов, использованных в экспериментальной установке, близок к среднему углу наклона кривых на графике (рис. 3) Некоторое замедление скорости движения фронта плавления объясняется потерями тепла через стенки пористого массива.

Выводы

Во всех проделанных нами опытах фронт плавления легкоплавкой твёрдой фазы, частично заполнявшей поровое пространство модельного массива, был неустойчив. Установлено, что температура на фронте постоянна и равна температуре плавления твёрдой фазы. Это даёт возможность предположить, что динамика продвижения фронта плавления определяется переносом тепла в потоке жидкости. Рассмотренная однотемпературная модель конвективного переноса тепла при различных долях легкоплавкой фазы в поровом пространстве и скоростях фильтрации жидкости качественно соответствует результатам эксперимента.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (НШ-3345.2014.5) и РФФИ (проект № 13-05-01105).

Литература

Кокорев В.И. Основы управления термогазовым воздействием на породы баженновской свиты применительно к геологическим условиям Средне-Назымского и Галяновского месторождений // Нефтепромысловое дело. 2010. № 6. С. 29–32.

Сониц В.П., Батулин Ю.Е., Малышев А.Г., Зарипов О.Г., Шеметилло В.Г. Проблемы и перспективы освоения баженновской свиты // Нефтяное хозяйство. 2001. № 9. С. 36–68.

Martins M.F. et al. Co-current combustion of oil shale part 1–2 // Fuel. Volume 89, Issue 1, 2010, p. 133–151.

Coaxing oil from shale // Oilfield review winter 2010/11: 22, No.4, Schlumberger 2011, p. 7–8.