

УДК 532.546

## БАРОТЕРМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ АНОМАЛЬНОЙ НЕФТИ И ВОДЫ

Р. Ф. Шарафутдинов

Башкирский государственный университет, 450000 Уфа

На основе численного исследования температурного поля баротермического эффекта при фильтрации аномальной нефти и воды установлены закономерности формирования температуры на выходе из пласта. Показано, что аномальные свойства нефти приводят к усилению вклада адиабатического охлаждения в начальные моменты времени после пуска скважины в работу. При совместном движении аномальной нефти и воды наблюдается немонотонная зависимость температуры флюида от насыщенности пласта водой.

Как известно, исследование температурных полей, обусловленных проявлением баротермического эффекта, имеет важное практическое значение. В настоящее время в основном изучены температурные поля, связанные с эффектом Джоуля — Томсона и адиабатическим эффектом при фильтрации ньютоновской жидкости [1–3].

Баротермический эффект при фильтрации аномальной жидкости изучен недостаточно. В работе [4] рассматривается приближенное аналитическое решение задачи о температурном поле баротермического эффекта при фильтрации вязкопластичной нефти.

В данной работе численно исследуется температурное поле, обусловленное эффектом Джоуля — Томсона и адиабатическим эффектом при фильтрации аномальной нефти и воды. Математическая модель неизотермической фильтрации аномальной нефти и воды не учитывает диффузионный перенос массы и теплоты, взаимное растворение нефти и воды, теплообмен с окружающей средой, гравитационные и капиллярные силы.

1. В основе математической модели лежат уравнения сохранения масс фаз, уравнение движения и притока тепла.

С учетом сделанных замечаний в плоскорадиальном случае уравнение сохранения масс фаз имеет следующий вид:

$$\frac{\partial m\rho_i S_i}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r m\rho_i S_i V_i}{\partial r} = \hat{0}, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

Индексы  $i$  соответствуют различным фазам, а именно: 0 — порода, 1 — вода, 2 — нефть;  $S_i$  и  $V_i$  — насыщенность и скорость движения  $i$ -й фазы;  $\rho_i$  — плотность  $i$ -й фазы;  $m$  — пористость.

Уравнение движения для воды запишем в форме закона фильтрации Дарси

$$mS_1 V_1 = -\frac{K k_i}{\mu_1} \frac{\partial P}{\partial r}. \quad (2)$$

Для нефтяной фазы примем закон фильтрации вязкопластичной жидкости [5]

$$mS_i V_i = -\frac{K k_i}{\mu_i} \left( \frac{\partial P}{\partial r} - G \right) \quad \text{при} \quad \frac{\partial P}{\partial r} > G, \quad mS_i V_i = 0 \quad \text{при} \quad \frac{\partial P}{\partial r} < G. \quad (3)$$

Здесь  $K$  — абсолютная проницаемость;  $k_i$  — фазовая проницаемость;  $\mu_i$  — вязкость  $i$ -й фазы;  $P$  — давление;  $G$  — величина начального градиента давления сдвига.

Уравнение притока тепла в приближении однотемпературной модели с учетом эффекта Джоуля — Томсона, адиабатического эффекта и конвективного теплопереноса в пренебрежении теплопроводностью имеет вид [1, 6]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[ (1-m)\rho_0 C_0 T + \sum_{i=1}^2 m \rho_i C_i S_i T \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \left[ m \sum_{i=1}^2 \rho_i C_i S_i V_i T \right] + \\ + m \sum_{i=1}^2 \rho_i C_i S_i V_i \varepsilon_i \frac{\partial P}{\partial r} - m \sum_{i=1}^2 \rho_i C_i S_i \eta_i \frac{\partial P}{\partial t} = 0. \quad (4) \end{aligned}$$

Здесь введены следующие термодинамические параметры:  $T$  — температура;  $C_i$  — теплоемкость;  $\varepsilon_i$  — коэффициент Джоуля — Томсона;  $\eta_i$  — адиабатический коэффициент  $i$ -й фазы.

Первое слагаемое уравнения (4) выражает изменение теплосодержания системы, второе — конвективный теплоперенос, третье и четвертое — вклад эффекта Джоуля — Томсона и адиабатического эффекта соответственно.

Начальные и граничные условия имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} t = 0, \quad r > 0: \quad S_i = S_{i0}, \quad P = P_0, \quad T = T_0, \\ t > 0, \quad r = R_0: \quad P = P_K(t), \quad P_K^0 \leq P_K(t) \leq P_0, \\ t > 0, \quad r = R: \quad P = P_0, \quad S_i = S_i^0, \quad T = T_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Фазовые проницаемости задавались в форме, приведенной в работе [7]. Плотности нефти и воды являются функциями давления и температуры.

Система уравнений (1)–(4) с начальными и граничными условиями (5) решалась численно на основе консервативной конечно-разностной схемы сквозного счета. Насыщенности фаз и температура вычислялись по явной схеме, давление — по неявной. Тестирование проводилось по известным аналитическим решениям теплового поля эффекта Джоуля — Томсона для фильтрации ньютоновской нефти [1].

2. Расчеты проведены для следующих модельных значений термогидродинамических параметров фаз, приближенных к реальным пластовым значениям [1, 8]:

$$\begin{aligned} C_0 = 800 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad C_1 = 4000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad C_2 = 2000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \\ \varepsilon_1 = 0,2 \text{ К}/\text{МПа}, \quad \varepsilon_2 = 0,4 \text{ К}/\text{МПа}, \quad \eta_1 = 0,015 \text{ К}/\text{МПа}, \quad \eta_2 = 0,13 \text{ К}/\text{МПа}. \end{aligned}$$

Начальное пластовое давление  $P_0$  и минимальное давление  $P_K^0$  на границе пласта ( $r = R_0$ ) равны 20,0 и 14,0 МПа соответственно.

Расчеты проведены для следующих начальных градиентов давления сдвига [9]:  $G = 0; 0,02; 0,05$  МПа/м. Вязкости воды и нефти приняты равными соответственно  $\mu_1 = 0,1$  мПа·с,  $\mu_2 = 0,4$  мПа·с. Начальная водонасыщенность изменялась в следующих пределах:  $S_0 = 0; 0,25; 0,5; 0,7$ .

3. На рис. 1 приведены результаты расчета температурного поля при фильтрации аномальной нефти с различными начальными градиентами давления сдвига: 1 —  $G = 0$ ; 2 —  $G = 0,2$  МПа/м; 3 —  $G = 0,5$  МПа/м. При  $G = 0$  зависимость температуры от времени аналогична решению задачи о температурном поле баротермического эффекта при фильтрации ньютоновской нефти [1]. Рис. 1 позволяет провести сравнение экспериментальной зависимости температуры, полученной при исследовании скважины 6558 (Башкирия) (кривая 5), с расчетной (кривая 4) для  $K/\mu_2 = 0,35$ .

На графике зависимости температуры от времени видны характерные участки, связанные с проявлением адиабатического эффекта и эффекта Джоуля — Томсона. Вначале,

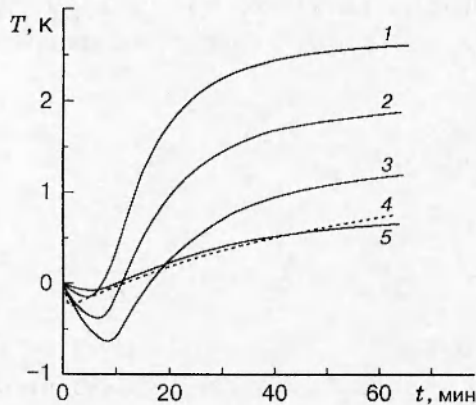


Рис. 1. Зависимость температуры от времени при различных начальных градиентах давления сдвига:

1 —  $G = 0$ ; 2 —  $G = 0,2$  МПа/м; 3 —  $G = 0,5$  МПа/м; 4 —  $G = 0$ ,  $K/\mu_2 = 0,35$ ; 5 — результаты исследований скважины 6558 (Башкирия)

после пуска скважины в работу (снижение давления на выходе из пласта), наблюдается адиабатическое охлаждение нефти. В дальнейшем за счет преобладания дроссельного разогрева над адиабатическим охлаждением отмечается повышение температуры и установление положительной стационарной температуры. При фильтрации аномальной нефти формирование температурного поля на выходе из пласта аналогично случаю фильтрации ньютоновской нефти. Однако с увеличением начального градиента давления вклад охлаждения за счет адиабатического эффекта возрастает (кривые 2 и 3 на рис. 1) и наблюдается смещение минимума температуры в область больших времен. При этом величина стационарной положительной аномалии уменьшается.

На рис. 2 изображены зависимости температуры от времени на выходе из пласта при различной насыщенности пласта водой (обводненности) для начального градиента давления  $G = 0,2$  МПа/м. Наблюдается немонотонная зависимость температуры на выходе из

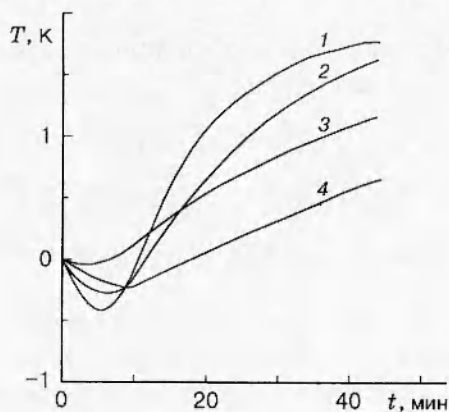


Рис. 2

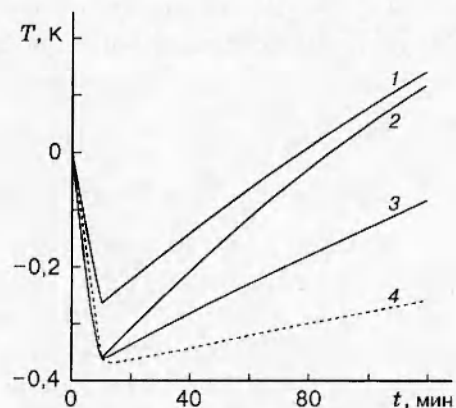


Рис. 3

Рис. 2. Зависимость температуры от времени при различной начальной водонасыщенности ( $G = 0,2$  МПа/м):

1 —  $S = 0$ ; 2 —  $S = 0,25$ ; 3 —  $S = 0,7$ ; 4 —  $S = 0,5$

Рис. 3. Зависимость температуры от времени при различной вязкости нефти ( $G = 0,02$  МПа/м):

1 —  $\mu_2 = 4$  мПа·с (без учета начального градиента сдвига); 2 —  $\mu_2 = 2$  мПа·с; 3 —  $\mu_2 = 4$  мПа·с; 4 —  $\mu_2 = 10$  мПа·с

пласта от насыщенности пласта водой. С увеличением насыщенности пласта водой (кривые 1, 2 и 4 на рис. 2) величина адиабатического охлаждения и дроссельного разогрева уменьшается, а минимум температуры смещается в область больших времен. При дальнейшем увеличении насыщенности пласта водой, в частности при  $S = 0,7$  (кривая 3 на рис. 2), зафиксировано увеличение дроссельного разогрева флюида на выходе из пласта.

На рис. 3 представлены особенности температурного поля при фильтрации аномальной нефти с разными значениями вязкости нефти. Видно, что увеличение вязкости нефти (уменьшение подвижности) приводит к увеличению продолжительности влияния адиабатического охлаждения по сравнению с дроссельным разогревом нефти.

Таким образом, влияние аномальных свойств жидкостей на температурное поле, обусловленное баротермическим эффектом, сводится, с одной стороны, к усилению вклада адиабатического охлаждения до развития фазы движения аномальной жидкости в начальные моменты времени после пуска скважины в работу, с другой — к уменьшению дроссельного разогрева аномальной нефти. При совместном движении аномальной нефти и воды наблюдается немонотонная зависимость температурного поля от насыщенности пласта водой, которая заключается в первоначальном уменьшении положительной температурной аномалии при увеличении насыщенности пласта водой и возрастании ее при дальнейшем увеличении обводненности пласта. Полученные результаты могут быть использованы при интерпретации данных термических исследований на месторождениях с аномальными свойствами нефти.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чекалюк Э. Б. Термодинамика нефтяного пласта. М.: Недра, 1965.
2. Валиуллин Р. А., Рамазанов А. Ш. Термические исследования при компрессорном освоении скважин. Уфа: Изд-во Башкир. ун-та, 1992.
3. Валиуллин Р. А., Рамазанов А. Ш., Шарафутдинов Р. Ф. Баротермический эффект при трехфазной фильтрации с фазовыми переходами // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1994. № 6. С. 113–117.
4. Филиппов А. И., Хусаинова Г. Я. Баротермический эффект в аномальных жидкостях // Прикладная физика и геофизика: Сб. науч. тр. Уфа: Изд-во Башкир. ун-та, 1995. С. 131–135.
5. Мирзаджанзаде А. Х., Ковалев А. Г., Зайцев Ю. В. Особенности эксплуатации месторождений аномальных нефтей. М.: Недра, 1972.
6. Федоров К. М., Шарафутдинов Р. Ф. К теории неизотермической фильтрации с фазовыми переходами // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1989. № 5. С. 78–85.
7. Басниев К. С., Кочина И. Н., Максимов В. М. Подземная гидромеханика. М.: Недра, 1993.
8. Гиматудинов Ш. К., Ширковский А. И. Физика нефтяного и газового пласта. М.: Недра, 1982.
9. Девликамов В. В., Хабибуллин З. А. Аномальные нефти. М.: Недра, 1975.

*Поступила в редакцию 14/X 1997 г.,  
в окончательном варианте — 17/VI 1998 г.*