

УДК 532.5

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ПЛАСТУ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ НЕФТИ

© Н. Н. Морозкин

Башкирский государственный университет
Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

Email: Nnm_89@mail.ru

В работе рассматривается процесс фильтрации вязкопластичной нефти. Для моделирования вязкопластичных свойств нефти используется модель, в которой вязкость зависит от градиента давления. Для моделирования процесса неизоэнтальной фильтрации используется система из уравнений пьезопроводности и энергии. При этом, в уравнении энергии учитывается адиабатический эффект и эффект Джоуля-Томсона. В статье приведены уравнения, по которым производился расчет, присутствует численная схема и входные данные. Проведены расчеты для разного времени протекания процесса фильтрации. Приведены графики распределения температуры по пласту для случая вязкопластичной и обычной нефтей.

Ключевые слова: Неизоэнтальная фильтрация, зависимость вязкости от градиента давления, градиент сдвига, предельный градиент, аномальная нефть, вязкопластичная нефть, высоковязкая нефть, термометрия.

Введение

Как известно, доля добычи трудноизвлекаемых запасов нефти, к которым относятся высоковязкие нефти, в последние годы постоянно увеличивается. Тяжелые нефти относятся к неньютоновским жидкостям. Для данных жидкостей не выполняется закон Дарси в чистом виде. Чаще всего неньютоновские нефти являются вязкопластичными жидкостями. Данные жидкости обладают следующими особенностями: когда градиент давления меньше предельного, скорость течения таких жидкостей через пористую среду мала. Когда градиент давления больше предельного скорость движения значительно возрастает (в данной работе предполагается, что скорость возрастает в 100 раз). Существует большое количество способов моделирования такого поведения нефти, обзор некоторых из них приведен в работе [4]. Так в работе [1] считается, что до преодоления градиента сдвига скорость фильтрации нефти равно нулю, таким образом, образуются две зоны: зона фильтрации и застойная зона. Однако, как указано в работах [2–3] реальная нефть течет и до преодоления градиента сдвига, хотя и очень медленно.

В настоящей работе используется способ моделирования скорости фильтрации, связанный с зависимостью вязкости от градиента давления, представленный в работе [4]. Такой способ моделирования позволяет учитывать медленное движение нефти до преодоления градиента сдвига и более точно аппроксимирует экспериментальные данные [3].

Бывают случаи, когда данных по давлению недостаточно для определения процессов, происходящих в пласте и скважине. В этих случаях в качестве дополнительного параметра использует данные по температуре, поскольку за изменением давления в пласте или в скважине, следует изменения температуры. Основной вид уравнения, в котором

учитываются эффекты Джоуля-Томсона и адиабатический эффект, приведен в книге [5]. В настоящей работе использоваться данное уравнение для определения поля температуры при фильтрации вязкопластичной нефти. Данная работа является продолжением серии работ, посвященных фильтрации вязкопластичной нефти. Расчеты поля давления, поля скорости и других гидродинамических параметров в случае стационарного уравнения пьезопроводности представлены в работе [6], в случае нестационарного уравнения – в работе [7].

Постановка задачи

Математическая модель радиально симметричного процесса фильтрации описывается следующим уравнением:

$$m \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r p v] = 0 \quad (1)$$

Здесь m – пористость среды; p – давление; t – время; r – текущий радиус; ρ – плотность; v – скорость фильтрации; плотность нефти определяется по формуле [8] (2),

$$\rho = \rho_0(1 + \beta(p - P_0)) \quad (2)$$

Закон Дарси будет иметь вид (3):

$$v = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (3)$$

Здесь k – проницаемость; μ – вязкость;

Зависимость вязкости от градиента давления будет иметь вид (4):

$$\mu = \mu \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\mu_H - \mu_L}{1 + e^{glad \left(\frac{\partial p}{\partial r} - G \right)}} \quad (4)$$

G – градиент сдвига (предельный градиент давления). μ_H – вязкость до преодоления предельного градиента давления; μ_L – вязкость после преодоления предельного градиента давления; $glad$ –

параметр, который математически отвечает за гладкость функции вязкости, а физически за скорость разрушения структуры нефти. В [2] указаны преимущества данного способа моделирования.

Ограничения на переменные будет иметь вид (5):

$$R_w < r < R_k, 0 < t \leq t_k \quad (5)$$

Начальное условие записывается в виде (6)

$$P(r, 0) = P_0 \quad (6)$$

Граничные условия будут иметь вид (7)

$$p(R_w, t) = P_w, p(R_k, t) = P_0 \quad (7)$$

Задача (1–7) дополняется уравнением энергии (8). При этом для уравнения (8) решение задачи (1–7) является источниками слагаемыми.

$$\left[m\rho c_p + (1-m)\rho_{sk}c_{sk} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T}{\partial r} \right] - \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial r} + \eta m \rho c_p \frac{\partial p}{\partial t} - \xi \rho c_p v \frac{\partial p}{\partial r} \quad (8)$$

Здесь c_p – теплоемкость среды; λ – теплопроводность среды; η – адиабатический коэффициент; ξ – коэффициент Джоуля-Томсона; m – пористость среды; c_{sk} теплоемкость пористой среды; ρ – плотность жидкости; ρ_{sk} плотность пористой среды. Отметим что уравнение энергии (8) учитывает такие эффекты как адиабатический эффект, эффект Джоуля-Томсона конвективный и кондуктивный теплопереносы.

С начальным условием (9)

$$T(r, 0) = T_0 \quad (9)$$

С граничными условиями (10)

$$\frac{\partial T(R, t)}{\partial r} = 0, T(R, t) = T_0 \quad (10)$$

Задача. Рассчитать распределения температуры по пласту для различных времен протекания процесса фильтрации и провести анализ.

Разностная схема

Уравнение (1) аппроксимируется неявной схемой (11):

$$m\beta\rho_0 \frac{p_i^j - p_{i-1}^{j-1}}{\tau_{j+1}} = k \frac{1}{r_i} \frac{1}{h} \left[(rp^j)_{i+\frac{1}{2}} \frac{p_{i+1}^j - p_i^j}{h\mu(p_{i+1}^j, p_i^j)} - rp^j_{i-1} + 12p_{ij} - p_{i-1}^j - 1j\mu p_{i+1}^j + 1j, p_{i-1}^j - 1j \right] \quad (11)$$

Уравнение (8) аппроксимируется неявной схемой (12):

$$\left[mp_i^j c_p + (1-m)\rho_{sk}c_{sk} \right] \frac{T_i^j - T_i^{j-1}}{\tau} = \lambda \frac{1}{r_i} \frac{1}{h} \left[r_{i+\frac{1}{2}} \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{h} - r_{i-\frac{1}{2}} \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{h} \right] - p_j^j C_p \frac{k}{\mu(p_{i+1}, p_i)} \frac{p_{i+1}^j - p_i^j}{h} \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{h} + \eta m p_i^j C_p \frac{p_i^j - p_{i-1}^{j-1}}{\tau} - \xi p_i^j C_p \frac{k}{\mu(p_{i+1}, p_i)} \left(\frac{p_{i+1}^j - p_i^j}{h} \right)^2 \quad (12)$$

Аппроксимация вязкости осуществляется по формуле (13):

$$\mu = \mu(p_{i+1}, p_i) = \frac{\mu_H - L}{1 + e^{\text{glad} \left(\frac{p_{i+1} - p_i - G}{h} \right)}} + \mu_L \quad (13)$$

где τ – шаг по времени h – шаг по пространству.

Для ускорения расчетов вводились неравномерные сетки, представленные в работе [9].

Входные данные

$R_w=0.1$ м; $R_k=100$ м; $\beta=10^{-8}$ 1/Па; $\rho=1000$ кг/м³; $P_0=10$; $P_w=5$ МПа; $\mu_H=0.1$ Па·с; $G=1.5 \cdot 10^5$ Па/м; $\mu_L=0.001$ Па·с; $\text{glad}=10$ м/атм; $T_0=300$ К; $c_p=800$ Дж/(кг·К); $\rho_{sk}=2300$ кг/м³; $c_{sk}=450$ Дж/(кг·К); $\lambda=2.5$ Вт/(м·К); $\eta=1.7 \cdot 10^{-7}$ К/Па; $\xi=4.5 \cdot 10^{-7}$ К/Па.

Расчеты также проводились для обычной нефти. При этом вязкость нефти считалось равной $=0.01$ Па·с.

Результаты расчетов

Данные по гидродинамической части исследования были опубликованы в более ранних работах. Рассмотрим получившиеся графики распределения температурного поля по пласту.

Сравним кривые распределения температуры ньютоновской и вязкопластичной нефтей. Как видно на *рис. 1* в момент времени $t=0.24$ часа на скважине температура вязкопластичной нефти больше температуры ньютоновской нефти. В некотором отдалении от скважины температура вязкопластичной нефти становится меньше температуры ньютоновской нефти. На еще большем расстоянии от скважины температуры нефтей совпадают с начальной пластовой температурой, так как возмущение еще не дошло до данных участков.

На *рис. 2* представлены графики распределения температуры вязкопластичной и обычной нефти в момент времени 24 ч. Как видно из графиков вблизи скважины температура вязкопластичной уже ниже температуры обычной нефти. Далее по мере удаления от скважины температура вязкопластичной нефти становится выше температуры ньютоновской нефти. В правом верхнем углу рисунка увеличена область от 50 до 60 м по радиусу пласта. Видно, что в этой области температура вязкопластичной нефти больше температуры обычной нефти. Данное явление можно объяснить преобладанием адиабатического эффекта.

На *рис. 3* представлены графики распределения температуры по пласту для вязкопластичной и обычной нефти в стационарном случае. Как видно температура вязкопластичной нефти везде больше температуры обычной нефти, за исключением граничных значений.

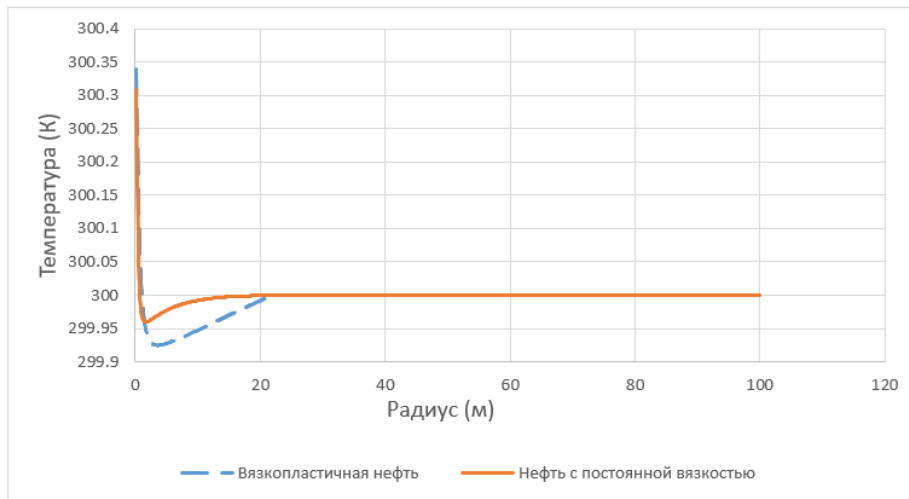


Рис. 1. Распределение температуры по пласту при фильтрации вязкопластичной и обычной нефти в момент времени 0.24 ч.

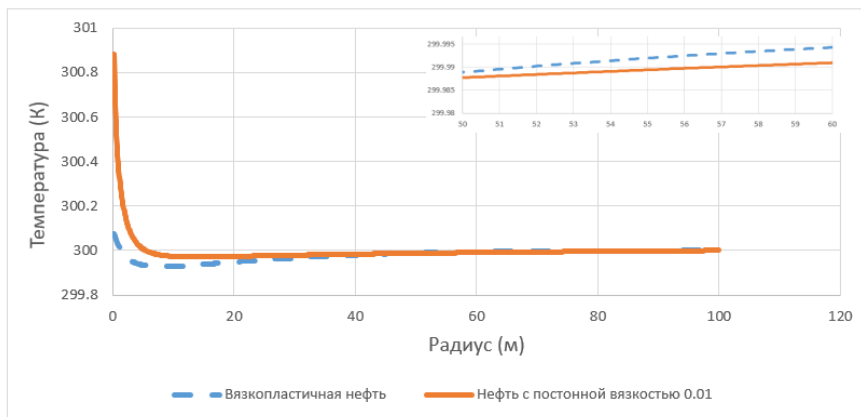


Рис. 2. Распределение температуры по пласту при фильтрации вязкопластичной и обычной нефти в момент времени 24 ч.

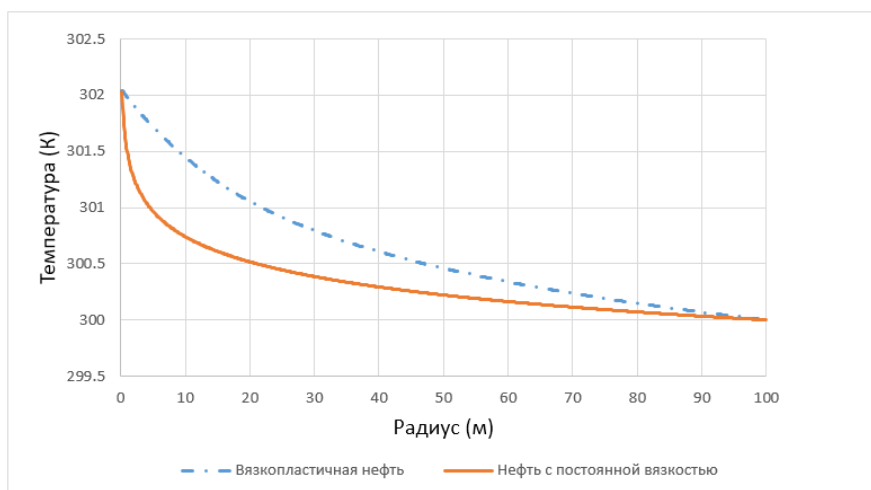


Рис. 3. Распределение температуры по пласту при фильтрации вязкопластичной и обычной нефти в стационарном случае.

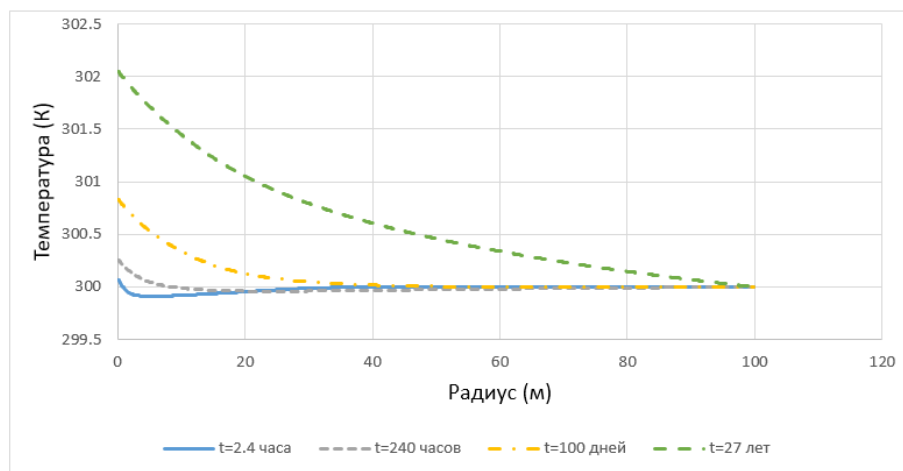


Рис. 4. Распределение температуры вязкопластичной нефти по пласту в различные моменты времени.

На рис. 4 представлены графики распределения температуры по пласту во времени. Рассмотрев рис. 4, можно увидеть в начальные моменты времени на некоторых участках пласта преобладает адиабатический эффект, со временем начинает преобладать эффект Джоуля-Томсона и температура вязкопластичной нефти становится больше начальной температуры. Рассмотрев рис. 3–4, можно сделать вывод, что в момент времени 27 лет температура вязкопластичной нефти практически совпадает с стационарным случаем.

Заключение

Расчеты показали, что при малых моментах времени температура вязкопластичной нефти на скважине выше, а на некотором отдалении от скважины ниже температуры обычной ньютоновской нефти. В момент времени 24 ч. температура вязкопластичной нефти в первой половине пласта меньше температуры обычной нефти, во второй половине пласта благодаря адиабатическому эффекту наблюдается обратная картина.

С увеличением времени температура вязкопластичной нефти вблизи скважины повсюду остается ниже температуры ньютоновской нефти. При этом по мере отдаления от скважины температура вязкопластичной нефти повышается и становится выше температуры обычной нефти, выравниваясь при приближении к границе. Отметим, что при дальнейшем увеличении времени графики распределения температуры обычной и вязкопластичной нефтей все более приближаются.

В стационарном режиме температура вязкопластичной нефти всюду выше температуры нефти с постоянной вязкостью, за исключением границ.

В начальные моменты времени на некоторых участках пласта преобладает адиабатический эффект, в результате которого температура вязкопластичной нефти становится меньше первоначально заданного значения. Со временем начинает преобладать эффект Джоуля-Томсона и температура вязкопластичной нефти становится больше начальной температуры в каждой точке пласта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хайдар А. М. Расчетные исследования фильтрации вязкопластичной нефти при электромагнитном нагреве // Электр. научн. журнал «Нефтегазовое дело». 2006. №1. URL: http://ogbus.ru/authors/Haidar/Haidar_1.pdf
2. Алишаев М. Г., Розенберг М. Д., Теслюк Е. В. Неизотермическая фильтрация при разработке нефтяных месторождений. М.: Недра, 1985. 270 с.
3. Девликамов В. В., Хабибуллин З. А., Кабиров М. М. Аномальные нефти. М.: Недра, 1975. 168 с.
4. Морозкин Н. Н. Моделирование процесса фильтрации вязкопластичной нефти с учетом зависимости вязкости от градиента давления // Вестник БашГУ. 2014. Т. 19. №3. С. 781–784.
5. Чекалюк Э. Б. Термодинамика нефтяного пласта. М.: Недра, 1965. 232 с.
6. Морозкин Н. Н., Истрафилов М. Я. Расчет гидродинамических параметров при фильтрации вязкопластичной нефти в стационарном случае // Электр. Научн. журнал «Нефтегазовое дело». 2015. №3. С. 185–207. URL: http://ogbus.ru/issues/3_2015/ogbus_3_2015_p185-207_MorozkinNN_ru_en.pdf
7. Морозкин Н. Н. Исследование процесса нестационарной фильтрации вязкопластичной нефти // Нефтяное хозяйство. 2016, №6. С. 112–114.
8. Садретдинов А. А. Неизотермическая фильтрация сжимаемого флюида в системе скважина-пласт: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа, 2011. 125 с.
9. Морозкин Н. Н., Садретдинов А. А. Решение одной задачи фильтрации с использованием неравномерных сеток по пространству // Вестник БашГУ. 2013, Т. 18, №4, С. 965–968.

Поступила в редакцию 03.09.2018 г.

**DISTRIBUTION OF TEMPERATURE IN THE RESERVOIR DURING
THE FILTERING OF VISCOPLASTIC OIL**

© N. N. Morozkin

*Bashkir State University
32 Zaki Validi Street, 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.**Email: nnm_89@mail.ru*

The author of the article studied the process of filtration of viscoplastic oil. To simulate the viscoplastic properties of oil, a model was used, in which the viscosity depends on the pressure gradient. To simulate the process of non-isothermal filtration, a system of the equations of piezoconductivity and energy was used. In this case, the adiabatic effect and the Joule-Thomson effect are taken into account in the energy equation. The author of the article presents the equations for the calculation, the numerical scheme, and the input data. The calculations were carried out for different duration of the filtration process. The graphs of temperature distribution in the reservoir were made for the cases of viscoplastic and ordinary oils. According to the calculations, at short moments of time, the temperature of the viscous-plastic oil at the well is higher and at some distance from the well is lower than the temperature of ordinary Newtonian oil. At the time point of 24 hours, the temperature of the viscoplastic oil in the first half of the reservoir is lower than the temperature of ordinary oil, in the second half of the reservoir, the opposite is observed due to the adiabatic effect. At the initial moments of time, the adiabatic effect prevails in some parts of the reservoir; therefore, the temperature of the viscoplastic oil becomes lower than the initially specified value. Over the time, the Joule-Thomson effect begins to predominate, and the temperature of the viscous-plastic oil becomes higher than the initial temperature in every point of the reservoir.

Keywords: non-isothermal filtration, dependence of viscosity on pressure gradient, shear gradient, extreme gradient, abnormal oil, viscoplastic oil, high viscosity oil, thermometry.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Khaidar A. M. *Elektr. nauchn. zhurnal «Neftegazovoe delo»*. 2006. No. 1. URL: http://ogbus.ru/authors/Haidar/Haidar_1.pdf
2. Alishaev M. G., Rozenberg M. D., Teslyuk E. V. *Neizotermicheskaya fil'tratsiya pri razrabotke neftyanykh mestorozhdenii [Non-isothermal filtration in development of oil fields]*. Moscow: Nedra, 1985.
3. Devlikamov V. V., Khabibullin Z. A., Kabirov M. M. *Anomal'nye nefiti [Abnormal oil]*. Moscow: Nedra, 1975.
4. Morozkin N. N. *Vestnik BashGU*. 2014. Vol. 19. No. 3. Pp. 781–784.
5. Chekalyuk E. B. *Termodinamika nefyanogo plasta [Thermodynamics of oil reservoir]*. Moscow: Nedra, 1965.
6. Morozkin N. N., Istrafilev M. Ya. *Elektr. Nauchn. zhurnal «Neftegazovoe delo»*. 2015. No. 3. Pp. 185–207. URL: http://ogbus.ru/issues/3_2015/ogbus_3_2015_p185-207_MorozkinNN_ru_en.pdf
7. Morozkin N. N. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2016, No. 6. Pp. 112–114.
8. Sadretdinov A. A. *Neizotermicheskaya fil'tratsiya szhimaemogo flyuida v sisteme skvazhina-plast: diss. ... kand. fiz.-mat. nauk*. Ufa, 2011.
9. Morozkin N. N., Sadretdinov A. A. *Vestnik BashGU*. 2013, T. 18, No. 4, Pp. 965–968.

Received 03.09.2018.