

УДК 550.36:536.24

Особенности распределения температурного поля в пористом пласте с аномальной нефтью

Морозкин Н.Д., Галлямов В.В., Морозкин Н.Н.

Уфимский университет науки и технологий

Аннотация: В работе исследуется изменение температуры во времени на стенке скважины для нефти, вязкость которой существенно зависит от градиента давления. Такие нефти называют неньютоновскими или аномальными поскольку процесс фильтрации флюидов описывается не законом Дарси, а некоторым нелинейным законом. Рассматривается однотемпературная модель, т.е. предполагается, что температура флюида в пласте и температура ядра совпадают. При этом исследуются только естественные режимы разработки без каких-либо дополнительных воздействий на пласт. Показано, что в отличие от ньютоновской нефти, температура которой на стенке скважины непрерывно увеличивается с возрастанием времени, температура высоковязкой нефти в начальный период времени увеличивается, затем уменьшается и через определённое время вновь начинает возрастать. Такое нестандартное поведение температуры высоковязкой нефти связано с изменением во времени области разрушения структуры пласта.

Ключевые слова: высоковязкая нефть, закон Дарси, температура, давление, градиент давления, пористость, плотность, зона разрушения структуры пласта.

1. Постановка задачи

Математически процесс нестационарной фильтрации высоковязкой нефти в осесимметричном пористом пласте в цилиндрических координатах описывается уравнением сохранения массы

$$m \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho \vartheta) \quad (1)$$

где m — пористость пласта,

$$\rho = \rho_0 [1 + \rho_{fl} (P - P_0)], \quad (2)$$

ρ_{fl} — коэффициент сжимаемости флюида, ρ_0 — начальная плотность, P — давление, P_0 — начальное давление, ϑ — скорость фильтрации:

$$\vartheta = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (3)$$

В работе [1] для высоковязких нефтей приведены экспериментальные данные зависимости вязкости от градиента давления. В результате аппроксимации табличных данных эту зависимость можно записать в виде:

$$\mu = \frac{\mu_H - \mu_L}{1 + e^{\alpha(\frac{\partial P}{\partial r} - G)}} + \mu_L, \quad (4)$$

здесь μ_H — вязкость нефти с неразрушенной структурой, G — градиент давления предельного разрушения структуры (ГДПРС), μ_L — вязкость нефти при достижении

градиентом давления значения ГДПРС, α — параметр, подбираемый в зависимости от свойств нефти.

Процесс распространения тепла описывается уравнением сохранения энергии

$$(m\rho_{fl}c_{fl} + (1-m)\rho_{sk}c_{sk})\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) - \rho_{fl}c_{fl}\vartheta\frac{\partial T}{\partial r} + m\eta\rho_{fl}c_{fl}\frac{\partial P}{\partial t} - \varepsilon\vartheta\rho_{fl}c_{fl}\frac{\partial P}{\partial r}, \quad (5)$$

$$R_w < r < R_k, 0 < t < \bar{t},$$

где λ — коэффициент теплопроводности пористой среды, η — адиабатический коэффициент, ε — коэффициент Джоуля-Томпсона, R_w — радиус скважины, R_k — радиус расчётной области.

Уравнения (1) и (5) дополняются начальными и граничными условиями. Для уравнения (1) они записываются в виде:

$$P(0, r) = P_k, \quad R_w \leq r \leq R_k \quad (6)$$

$$P(t, R_w) = P_w, \quad P(t, R_k) = P_k, \quad 0 \leq t \leq \bar{t}, \quad (7)$$

А для уравнения (5) эти условия записываются так:

$$T(0, r) = T_0, \quad R_w \leq r \leq R_k, \quad (8)$$

$$T(t, R_k) = T_0, \quad \frac{\partial T(t, R_w)}{\partial r} = 0, \quad 0 \leq t \leq \bar{t}. \quad (9)$$

2. Методика решения

Система уравнений (1)–(4), (6), (7) решается методом конечных разностей с использованием неявной разностной схемы [2]. При этом на каждом временном слое приходится решать систему нелинейных алгебраических уравнений. Такая система уравнений решается при помощи метода Ньютона, а системы линейных алгебраических уравнений на итерациях метода Ньютона решаются методом прогонки.

Уравнение сохранения энергии (5) с начальными (8) и граничными (9) условиями решается также методом конечных разностей. Поскольку в уравнение (5) входят члены, содержащие производные давления по t и r , то в целях упрощения расчётов дискретизация системы уравнений (5), (8), (9) осуществляется на той же сетке, что и уравнений (1)–(4), (6), (7).

3. Результаты вычислительного эксперимента

3.1. Входные данные

Для проведения вычислительных экспериментов выбраны следующие параметры:

$$\begin{aligned} R_w &= 0.1 \text{ м}, & p_w &= 5 \cdot 10^6 \text{ Па}, & T_0 &= 300 \text{ К}, \\ R_k &= 100 \text{ м}, & p_k &= 10^7 \text{ Па}, & c_{fl} &= 1800 \text{ Дж/(кг·К)}, \\ \beta_{sl} &= 10^{-8} \text{ 1/Па}, & \mu_H &= 0.1 \text{ Па·с}, & \rho_{fl} &= 940 \text{ кг/м}^3, \\ \beta_{sk} &= 4.5 \cdot 10^{-10} \text{ 1/Па}, & m &= 0.2, & c_{sk} &= 450 \text{ Дж/(кг·К)}, \\ G &= 1.5 \cdot 10^5 \text{ Па/м}, & \mu_L &= 0.001 \text{ Па·с}, & \rho_{sk} &= 2300 \text{ кг/м}^3, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_0 &= 1000 \text{ кг/м}^3, & k &= 10^{-12} \text{ м}^2, & \eta &= 1.7 \cdot 10^{-7} \text{ К/Па}, \\ P_0 &= 10^7 \text{ Па}, & \lambda &= 2.5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}, & \xi &= 4.5 \cdot 10^{-7} \text{ К/Па}, & \alpha &= 10 \text{ м/Па}.\end{aligned}$$

3.2. Результаты расчётов

Расчёты давления из решения системы уравнений (1)–(4), (6), (7) приведены в работе [3]. Приведём результаты расчётов изменения температуры во времени на стенке скважины, поскольку именно эта температура представляет особый интерес для практики. Результаты представлены в виде графика (рис. 1).

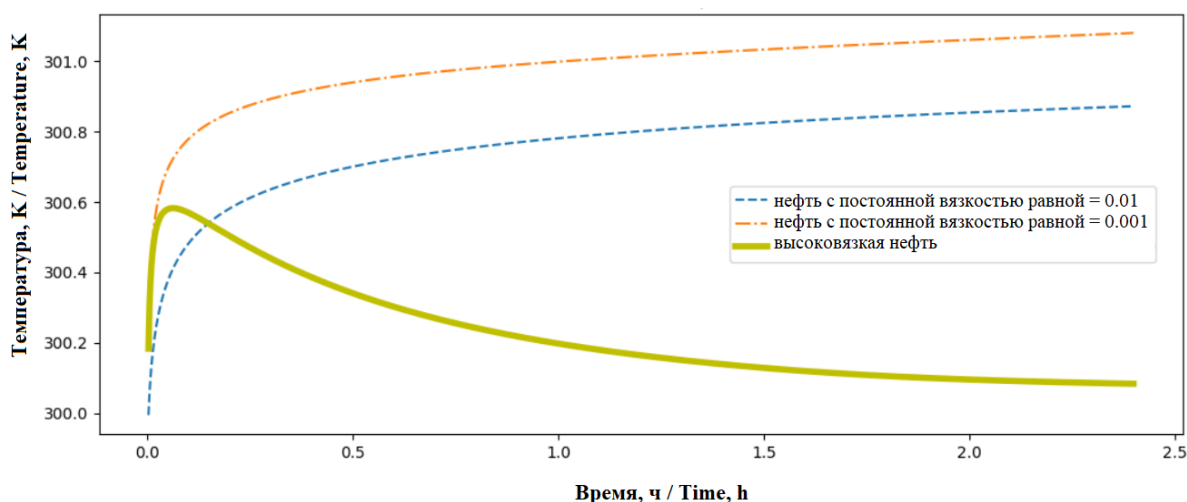


Рис. 1. Изменение температуры на стенке скважины во времени для нефтей различной вязкости спустя 2.5 часа.

Из рис. 1 видно, что температура высоковязкой нефти в начальный период времени так же, как и нефти с постоянной вязкостью, увеличивается, а затем снижается, в то время как температура нефти с постоянной вязкостью всё время увеличивается. Дальнейшие расчёты показывают, что для приведенных исходных данных процесс снижения продолжается в первые 24 часа, затем идёт процесс постоянного увеличения температуры.

Такое необычное поведение температуры высоковязкой нефти, как оказалось, связано с изменением зоны разрушения структуры пласта [3]. В первые часы после запуска скважины зона разрушения структуры пласта интенсивно расширяется, и температура снижается за счёт поступления более холодной нефти из зоны разрушения. Затем зона разрушения стабилизируется, и температура высоковязкой нефти с увеличением времени монотонно возрастает.

Литература

1. Девликамов В. В., Хабибуллин З. А., Кабиров М. М. Аномальные нефти. Москва: Недра, 1975. 168 с.
2. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва: Наука, 1983. 616 с.
3. Морозкин Н. Н. Исследование процесса нестационарной фильтрации вязкопластичной нефти // Нефтяное хозяйство. 2016. № 6. С. 112-114.

MSC 76S05

Features of Temperature-Field Distribution in a Porous Reservoir Containing Non-Newtonian (Abnormal) Oil

N.D. Morozkin, V.V. Gallyamov, N.N. Morozkin

Ufa University of Science and Technology

Abstract: The paper investigates the time-dependent temperature behaviour in the near-wellbore zone of a reservoir producing oil whose viscosity strongly depends on the pressure gradient. Such crudes are referred to as non-Newtonian (abnormal) oils because their flow is governed not by Darcy's law but by a certain nonlinear filtration law. A single-temperature model is adopted, i.e. the temperatures of the reservoir fluid and of the rock matrix are assumed identical. Only natural production regimes (no external thermal or hydraulic stimulation) are considered. It is shown that, unlike Newtonian oil whose temperature near the wellbore increases monotonically with time, the temperature of a high-viscosity oil first rises, then falls, and after a certain period rises again. It is also demonstrated that this non-standard thermal behaviour of high-viscosity oil related to the evolution of the reservoir-structure degradation zone.

Keywords: high-viscosity oil, Darcy's law, temperature, pressure, pressure gradient, porosity, density, reservoir destructure zone.

References

1. Devlikamov V. V., Khabibullin Z. A., Kabirov M. M. Anomal'nye nefti [Abnormal oils]. Moscow: Nedra, 1975. 168 p. (in Russian)
2. Samarskii A. A. Teoriya raznostnykh skhem [Theory of difference schemes]. Moscow: Nauka, 1983. 616 p. (in Russian)
3. Morozkin N. N. Issledovanie protsessa nestatsionarnoi fil'tratsii vyazkoplasticheskoi nefti [Study of unsteady filtration process of viscoplastic oil] // Neftyanoe khozyaistvo [Oil Industry]. 2016. No. 6. P. 112-114. (in Russian)