

*В.Ш. Шагапов, Ю.А. Юмагулова, А.А. Гиззатуллина*¹

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАСТЕ С ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТЬЮ ПРИ НАГРЕВАНИИ²

В радиально-симметричной постановке построена и исследована математическая модель задачи о нагревании пласта с высоковязкой нефтью через горизонтальную скважину и показаны возможности дальнейшей эксплуатации скважины для отбора нефти со сниженной вязкостью. Полученная система уравнений позволяет выявить динамику процесса, оценить характерные расстояния проникновения фильтрационных и температурных волн за рассматриваемые периоды времени.

Ключевые слова: высоковязкая нефть, нагревание нефтяного пласта, фильтрация нефти, снижение вязкости, давление пласта, горизонтальная скважина, температура пласта, отбор нефти из пласта.

Введение

В настоящее время перспективами развития нефтяной отрасли является разработка месторождений тяжелых нефтей и природных битумов. Интерес к таким месторождениям связан с постоянным ростом цен на углеводородное сырье, постепенным истощением запасов традиционной легкой нефти, а также развитием технологий разработки нетрадиционных источников углеводородного сырья. Будущее в разработке месторождений высоковязкой нефти неразрывно связано с применением тепловых методов воздействия, в основе которых лежит уменьшение вязкости нефти, улучшающее ее подвижность и скорость продвижения к скважине. Процесс теплового воздействия начинается со стадии предпрогрева, в течение которой за счет кондуктивного переноса тепла происходит разогрев зоны пласта вблизи добывающей скважины и снижается вязкость нефти. Затем проводится эксплуатация той же скважины для отбора из пласта нефти с пониженной вязкостью. Экономическая эффективность применения теплового воздействия в каждом конкретном случае во многом зависит от свойств пластовой нефти, глущины залегающего пласта и геолого-физических особенностей пласта [1–7].

¹© Шагапов В.Ш., Юмагулова Ю.А., Гиззатуллина А.А., 2016

Шагапов Владислав Шайхулагзамович (shagapov@rambler.ru), Юмагулова Юлия Александровна (ym_julia@mail.ru), Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН, 420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31.

Гиззатуллина Алина Азатовна (ezhiha27@mail.ru), кафедра высшей и прикладной математики, Бирский филиал Башкирского государственного университета, 452453, г. Бирск, Интернациональная, 10.

²Исследование выполнено с использованием гранта Российского научного фонда (проект № 15-11-10016).

В настоящей работе представлено теоретическое и численное исследование возможности нагрева нефтяного пласта с помощью горизонтального обогреваемого канала (в котором в качестве теплоносителя течет горячий пар, например), используемого впоследствии как добывающая скважина.

1. Постановка задачи и основные уравнения

Рассмотрим процесс нагревания нефтяного пласта через горизонтальную скважину. Запишем уравнения неразрывности и притока тепла для нефтяного пласта ($r_s < r < \infty$) в виде

$$\frac{\partial m \rho_l}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r m \rho_l v)}{\partial r} = 0, \quad (1.1)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_l m c_l v \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1.2)$$

где r – радиальная координата, отсчитываемая от центра скважины, r_s – радиус скважины, λ – теплопроводность, ρc – удельная теплоемкость пласта, m – пористость, T – температура пласта, v – скорость фильтрации нефти, ρ_l и c_l – плотность и теплоемкость нефти.

Для определения скорости фильтрации нефти запишем закон Дарси [8]

$$m v = - \frac{k}{\mu(T)} \frac{\partial p}{\partial r}. \quad (1.3)$$

Здесь k – проницаемость пористой среды, p – давление, $\mu(T)$ – вязкость нефти, зависимость которой от температуры можно принять в виде [1]

$$\mu(T) = \mu_0 e^{-\gamma(T-T_0)},$$

где γ – температурный коэффициент, μ_0 – вязкость нефти при температуре T_0 .

Уравнение состояния для нефти примем в линейном приближении [1; 9]

$$\rho_l = \rho_{l0} (1 - \alpha^{(T)}(T - T_0) + \alpha^{(p)}(p - p_0)). \quad (1.4)$$

Здесь нижний индекс 0 соответствует начальным значениям параметров нефти, $\alpha^{(T)}$ и $\alpha^{(p)}$ – коэффициенты термического расширения и сжимаемости нефти.

2. Нагревание нефтяного пласта

Рассмотрим первый этап, а именно процесс нагревания нефтяного пласта ($t < t_*$) через горизонтальную закрытую скважину при отсутствии фильтрации. В этом случае, пренебрегая конвективным переносом тепла, уравнение (1.2) будет иметь вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\aleph}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (2.1)$$

Здесь $\aleph = \lambda/(\rho c)$ – температуропроводность пласта.

Пусть на границе скважины $r = r_s$ поддерживается постоянная температура T_e , а вдали от скважины ($r \rightarrow \infty$) температура пласта равна T_0 . Данное условие

означает, что за представляющее интерес в данной задаче время область, в которой реализуются температурные перепады, значительно меньше толщины нефтяного пласта. В начальный момент времени ($t = 0$) температура равна T_0 .

Уравнение (2.1) решено методом конечных разностей с использованием явной схемы. Условие устойчивости разностной схемы определялось из условия Куранта [10]. При выполнении численных расчетов приняты следующие значения параметров: $T_e = 200$ °С, $T_0 = 15$ °С, $\mu_0 = 0.2$ Па·с, $\gamma = 0.028$ К⁻¹, $r_s = 0.1$ м, $\kappa = 10^{-6}$ м²/с.

На рис. 1 представлена зависимость вязкости нефти от температуры.

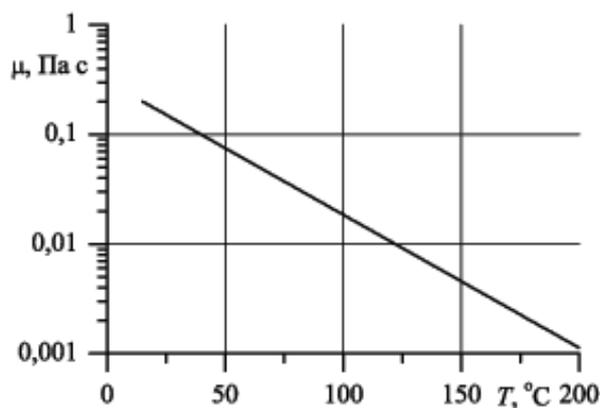


Рис. 1. Зависимость вязкости нефти μ от температуры T

Видно, что наиболее высокая скорость снижения вязкости наблюдается при начальном увеличении температуры, с достижением определенного значения температуры (приблизительно до 100 °С) снижение вязкости замедляется. Следует отметить, что уменьшение очень вязкой нефти хотя и может дать положительные результаты, но не всегда приводит к достаточному возрастанию ее текучести, так как с повышением температуры в зоне нагрева нефть может быть продвинута к скважине, но увеличивается риск закупорки пор при контакте нагретой нефти с более холодной.

На рис. 2 представлены поля температуры (а) и вязкости (б) нефтяного пласта в различные моменты времени $t_* = 10, 20, 30$ суток.

Показано, что на этом этапе появляется прогретая область порядка нескольких метров вблизи границы нагревания. По мере нагревания пласта происходит снижение вязкости нефти вблизи границы скважины. Выбор времени прогрева пласта t_* может быть определен в зависимости от толщины нефтенасыщенного слоя.

3. Фильтрация нефти

Рассмотрим второй этап работы скважины ($t > t_*$), при котором вблизи границы ($r = r_s$) находится разогретая нефть со сниженной вязкостью, т. е. в начальный момент времени ($t = t_*$) распределение температуры $T = T(r)$ определяется из предыдущего решения по уравнению (2.1). Из уравнений (1.1), (1.2) с учетом (1.3) и (1.4) получим уравнения для давления и температуры в виде

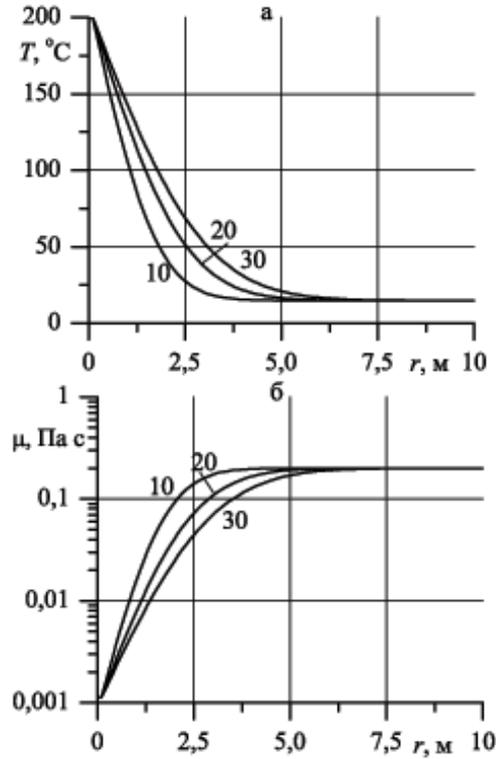


Рис. 2. Распределение температуры (а) и вязкости (б) по координате r в различные моменты времени прогревания $t_*=10, 20$ и 30 суток

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\alpha^{(T)}}{\alpha^{(p)}} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{k}{m\alpha^{(p)}r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r}{\mu(T)} \frac{\partial p}{\partial r} \right), \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\mu(t)} \frac{\partial p}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\varkappa}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (3.2)$$

Систему уравнений (3.1)–(3.2) необходимо дополнить граничными условиями. Пусть на границе $r = r_s$ поддерживается постоянное давление p_s ($p_s < p_0$) и отсутствует тепловой поток $\partial T/\partial r = 0$, а вдали от скважины ($r \rightarrow \infty$) заданы начальные значения давления и температуры p_0, T_0 .

Система уравнений (3.1)–(3.2) при заданных граничных условиях решена методом конечных разностей с применением явной схемы [10]. При выполнении численных расчетов для теплофизических параметров нефтяного пласта приняты величины $\alpha^{(T)} = 10^{-5} \text{ К}^{-1}$, $\alpha^{(p)} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$, $k = 10^{-12} \text{ м}^2$, $m = 0.3$, давление скважины равно $p_s = 0.3 \text{ МПа}$, начальное давление $p_0 = 0.5 \text{ МПа}$, время прогрева пласта $t_* = 30 \text{ сут}$.

На рис. 3 представлены поля давления (а), температуры (б) и вязкости (в) в различные моменты времени 1, 2 и 5 суток.

Видно, что фильтрационная волна проникает в нефтяной пласт значительно дальше области температурных перепадов. С течением времени происходят сни-

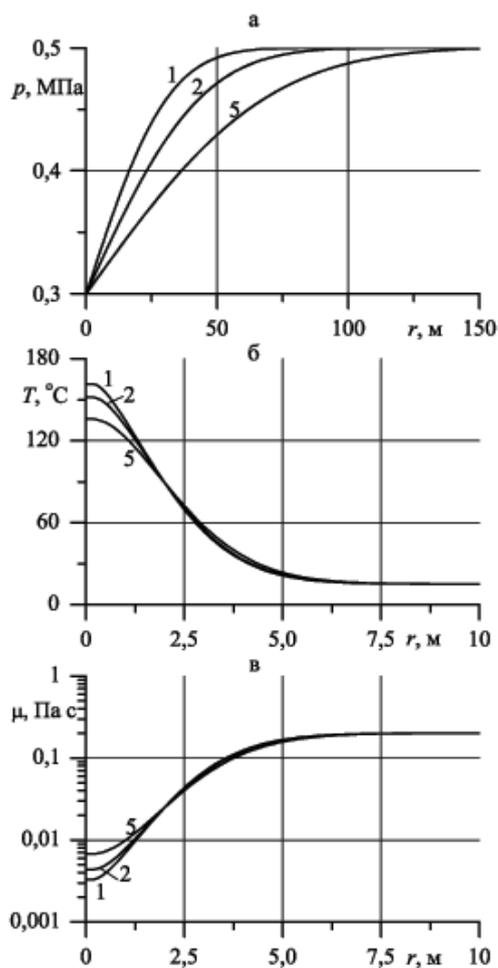


Рис. 3. Распределение давления (а), температуры (б) и вязкости (в) по координате в различные моменты времени фильтрации 1, 2 и 5 суток

жение температуры пласта вблизи скважины и соответствующее увеличение вязкости, что будет приводить к замедлению процесса фильтрации нефти в пласте.

Заключение

Получены численные решения задачи о возможности добычи высоковязкой нефти из пласта с применением теплового воздействия. На первом этапе происходит нагревание нефтяного пласта через горизонтальную скважину. Время прогрева определяется толщиной нефтенасыщенного слоя. На втором этапе происходит фильтрация нефти со сниженной вязкостью через имеющуюся горизонтальную скважину. Полученная система уравнений позволяет моделировать динамику давления и температуры в нефтяном пласте и тем самым описать процесс добычи высоковязкой нефти.

Литература

- [1] Бурже Ж., Сурио П., Комбарну М. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1988. 422 с.
- [2] Байбаков Н.К., Гарушев А.Р. Тепловые методы разработки нефтяных месторождений. М.: Недра, 1988. 344 с.
- [3] Кравчун С.Н., Липаев А.А. Метод периодического нагрева в экспериментальной теплофизике. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2006. 208 с.
- [4] Шейнман А.Б., Малофеев Г.Е., Сергеев А.И. Воздействие на пласт теплом при добыче нефти. М.: Недра, 1969. 256 с.
- [5] Мирзаджанзаде А.Х., Ковалев А.Г., Зайцев Ю.В. Особенности эксплуатации месторождений аномальных нефтей. М.: Недра, 1972. 200 с.
- [6] Butler R.M. Thermal recovery of oil and bitumen. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs., 1991. 292 p.
- [7] Butler R.M., Jiang Q. Improved recovery of heavy oil by vapex with widely spaced horizontal injectors and producers // *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2000. V. 39, № 1. P. 48–56.
- [8] Желтов Ю.П. Механика нефтегазонасного пласта. М.: Недра, 1975. 216 с.
- [9] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.; Ч. 2. 360 с.
- [10] Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.

References

- [1] Bourget J., Souriau P., Kombarnu M. Termicheskie metody povysheniia nefteotdachi plastov [Thermal enhanced oil recovery methods]. M.: Nedra, 1988, 422 p. [in Russian].
- [2] Baybakov N.K., Garush A.R. Teplovye metody razrabotki nefதியnykh mestorozhdenii [Thermal methods of oil field development]. M.: Nedra, 1988, 344 p. [in Russian].
- [3] Kravchun S.N., Lipaev A.A. Metod periodicheskogo nagreva v eksperimental'noi teplofizike [Periodic heating method in the experimental thermal physics]. Kazan: Izd-vo Kazan. un-ta, 2006, 208 p. [in Russian].
- [4] Scheinman A.B., Malofeev G.E., Sergeev A.I. Vozdeistvie na plast tepлом pri dobyche nefதிய [The impact of heat in the process of oil extraction]. M.: Nedra, 1969, 256 p. [in Russian].
- [5] Mirzadzhanzade A.H., Kovalev A.G., Zaitsev Yu.V. Osobennosti ekspluatatsii mestorozhdenii anomal'nykh nefதிய [Features of operation of abnormal deposits of oils]. M.: Nedra, 1972, 200 p. [in Russian].
- [6] Butler R.M. Thermal recovery of oil and bitumen. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, 1991, 292 p. [in English].
- [7] Butler R.M., Jiang Q. Improved recovery of heavy oil by vapex with widely spaced horizontal injectors and producers. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2000, Vol. 39, no. 1, pp. 48-56 [in English].
- [8] Zheltov Yu.P. Mekhanika nefதியgazonosnogo plasta [Mechanics of oil and gas reservoir]. M.: Nedra, 1975, 216 p. [in Russian].
- [9] Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznykh sred [Dynamics of multiphase media]. M.: Nauka, 1987. Part 1, 464 p. Part 2, 360 p. [in Russian].
- [10] Samarskii A.A. Teoriia raznostnykh skhem [Theory of difference schemes]. M.: Nauka, 1977, 656 p. [in Russian].

*V.Sh. Shagapov, Y.A. Yumagulova, A.A. Gizzatullina*³

MODELING THE DYNAMICS OF PRESSURE AND TEMPERATURE IN THE RESERVOIR WITH HEAVY OIL WHEN HEATED

In radially symmetric formulation is built and investigated mathematical model of the problem of heated heavy oil reservoir by horizontal well and the possibility of further operation of the well for the selection of oil with reduced viscosity. The resulting system of equations reveals the dynamics of the process, to evaluate the characteristics of the distance of penetration of filtration and thermal waves over the period.

Key words: heavy oil, heating oil reservoir, oil filtration, reduction in viscosity, pressure reservoir, horizontal well, reservoir temperature, the selection of oil from the reservoir.

Статья поступила в редакцию 18/II/2016.

The article received 18/II/2016.

³*Shagapov Vladislav Shayhulagzhamovich* (shagapov@rambler.ru), *Yumagulova Yulia Aleksandrovna* (ym_julia@mail.ru), Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2/31, Lobachevskiy Street, Kazan, 420111, Russian Federation.

Gizzatullina Alina Azatovna (ezhiha27@mail.ru), Department of Higher and Applied Mathematics, Birk branch of the Bashkir State University, 10, Internatsionalnaya Street, Birk, 452453, Russian Federation.