УДК 621.546 DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-54-61

КРИВОЛИНЕЙНОЕ РАДИАЛЬНОЕ ТЕЧЕНИЕ СЖИМАЕМОЙ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ НЕФТИ СО СВОБОДНОЙ ТЕКУЧЕСТЬЮ В ОДНОРОДНОМ ПЛАСТЕ

Дж.Н. Асланов tribo72@mail.ru
С.Д. Мустафаев
В.А. Ибрагимов
Р.Т. Алиева

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджанская Республика

Аннотация

Приведено решение стационарной гидродинамической задачи о плоскорадиальной фильтрации сжимаемой вязкопластичной нефти со свободной поверхностью в однородном горизонтальном круговом пласте. В центре пласта работает вертикальная эксплуатационная нефтяная скважина, которая является гидродинамически совершенной по характеру и степени вскрытия пласта. По обобщенным законам фильтрации Дарси и уравнениям состояния сжимаемой жидкости определены скорость слива массы сжимаемой вязкопластичной нефти и формулы текущей плотности, дебита нефти, текущего распределения давления в дренажной зоне и др. В формулах учтены сжимаемость и начальный градиент давления нефти. Определено время продвижения частицы нефти от текущего радиус-вектора и контура питания до скважины. Рассмотренный случай фильтрации нефти имеет место при залегании нефти в глубинах, близких к поверхности земли. В этом интервале глубин отсутствуют глинистые пласты и пропластки. Поскольку неглубокие нефтяные залежи эксплуатируются также и шахтным способом, то в качестве объекта эксплуатации можно использовать как скважины, так и галереи

Ключевые слова

Фильтрация свободной поверхности, вязкопластичная нефть, плоскорадиальный поток, скорость массовой фильтрации, уравнение состояния жидкости, коэффициент усадки нефти, текущий радиус-вектор, градиент давления, расход массы нефти

Поступила 16.10.2017
© Автор(ы), 2019

Нефть содержит различные парафины, масла, бензин, керосин, мазут, является неоднородным пластичным веществом и имеет определенные структурно-механические свойства. Когда нефтяные пласты находятся на

небольшой глубине, то ее структурно-механические свойства принимают большие значения и способность текучести массы ослабляется (уменьшается). Такие нефтяные пласты из-за пористых каналов имеют гидродинамическую связь с атмосферой. Бывают частные случаи, когда нефтяной пласт находится близко к поверхности земли. Известно, что поскольку слои пластов подвергаются малым сжатиям, то их проводимость бывает высокой и в большинстве случаев такие нефтяные пласты эксплуатируются шахтным способом [1–3].

Нефтяные пласты, имеющие связь с атмосферой, называются пластами со свободной поверхностью, а процесс их текучести называется свободной текучестью [4–6].

Отметим, что до сих пор нет работ, посвященных решению гидродинамических задач для вязкопластичной сжимаемой нефти со свободной текучестью. Поэтому настоящая работа посвящена гидродинамической задаче для вязкопластичной сжимаемой нефти при плоскорадиальном стационарном течении. Рассматривается случай, когда продуктивный пласт является однородным. Во время фильтрации начальный градиент давления проявляется и выход пород коллектора не учитывается. Предполагается, что месторождение имеет круглую форму (форму кольца), между нефтяной зоной и поверхностью земли глинистый слой (либо глинистый пласт) не оседает и в вертикальном положении скважина находится в центре кругового (кольцевого) месторождения [6–9].

В целях эксплуатации скважины для добычи нефти исследуется постоянная депрессия и создается плоскорадиальный фильтрационный поток свободной поверхности.

На основе обобщенного закона Дарси для определения скорости слива массы вязкопластичной сжимаемой нефти получено следующее дифференциальное выражение:

$$\rho\upsilon = -\frac{K}{\eta}\rho\left(\frac{dP}{dr} - G\right), \qquad (1)$$

где ρ — плотность нефти; υ — скорость фильтрации; K — коэффициент проницаемости пласта; η — структурная вязкость нефти в пластовых условиях; dP/dr — градиент давления; r — текущий радиус-вектор; G — начальный градиент давления.

Поскольку слив (скачивание) протекает в противоположном направлении относительно направления текущего радиус-вектора, то в (1) запишем знак «минус». И так как начальный градиент давления для каждой скважины — это постоянная величина, то (1) можно принять в виде

$$\rho\upsilon = -\frac{K}{\eta}\rho\frac{d(P-Gr)}{dr}. \tag{2}$$

Уравнение состояния сжимаемой жидкости имеет вид

$$\rho = \rho_{ат} e^{\beta(P-Gr-P_{ат})}, \tag{3}$$

где ρ — плотность нефти при давлении $(P - Gr - P_{ат})$; $\rho_{ат}$ — плотность нефти при атмосферном давлении $P_{ат}$; β — коэффициент сжимаемости нефти. Отсюда для градиента давления получаем следующее выражение:

$$\frac{d(P-Gr)}{dr} = \frac{1}{\beta}\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dr}. \tag{4}$$

Далее, из (2) и (4) имеем

$$\rho\upsilon = -\frac{K}{\eta\beta}\frac{d\rho}{dr}. \tag{5}$$

Для определения Q (массы выкачиваемой нефти) следует найти произведение скорости выкачивания (слива) ее массы на площадь поверхности слива $F = 2\pi rb$, т. е.

$$Q = \left|\rho\upsilon\right| F = \frac{2\pi Krb}{\eta\beta}\frac{d\rho}{dr}. \tag{6}$$

Из практических соображений решение уравнения (6) следует искать при условии

$$\rho\big|_{r=R} = \rho_k, \tag{7}$$

имеем

$$\rho = \int \frac{Q\eta\beta}{2\pi Kbr}dr = \frac{Q\eta\beta}{2\pi Kb}\ln r + C. \tag{8}$$

На основании (7) запишем

$$C = \rho_k - \frac{Q\eta\beta}{2\pi Kb}\ln R_k,$$

поэтому

$$\rho = \rho_k - \frac{Q\eta\beta}{2\pi Kb}\ln\frac{R_k}{r}, \tag{9}$$

откуда получим

$$Q = \frac{2\pi bK(\rho_k - \rho\ )}{\eta\beta \ln \dfrac{R_k}{r}}. \tag{10}$$

Учитывая (10) и (6), приведем алгоритм для определения скорости слива (выкачивания) нефти

$$\upsilon = \frac{K(\rho_k - \rho)}{\eta\beta r\rho \ln \dfrac{R_k}{r}}. \tag{11}$$

Из (2) и (11) получаем алгоритм для определения градиента давления

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{\rho_k - \rho}{\beta r\rho \ln \dfrac{R_k}{r}} + G. \tag{12}$$

Чтобы найти алгоритм для определения рабочего давления, из практических соображений следует найти решение уравнения (12), удовлетворяющее условию

$$P\big|_{r\,=\,R_k} = P_k. \tag{13}$$

Тогда

$$P = -\int\left(\frac{\rho - \rho_k}{\eta\beta r\rho \ln \dfrac{R_k}{r}} + G\right)dr = -\frac{\rho - \rho_k}{\eta\beta r\rho}\int \frac{dr}{r \ln \dfrac{R_k}{r}} + Gr =$$

$$= \frac{\rho - \rho_k}{\eta\beta\rho} \ln\left(\ln \frac{R_k}{r}\right) + Gr + C. \tag{14}$$

Откуда на основании (7) и (13) получим

$$C = P_k - GR_k,$$

следовательно,

$$P = P_k + \frac{\rho\ - \rho_k}{r\beta\rho} \ln\left(\ln \frac{R_k}{r}\right) - G(R_k - r). \tag{15}$$

Наконец найдем алгоритмы для определения времени передвижения произвольной частицы вязкопластичной жидкости от произвольной точки пласта до скважины (t) и от контура питания пласта до скважины (T). Если

$$W = \frac{dr}{dt} = \frac{V}{m}, \tag{16}$$

где W — среднее значение действительной скорости движения частицы жидкости в поровых каналах; m — коэффициент пористости пласта, то

$$t = m\int_{r_c}^{r} \frac{d\overline{r}}{v}; \quad T = m\int_{r_c}^{R_k} \frac{dr}{dt}, \tag{17}$$

где $r_c \le \overline{r} \le r$; $r_c \le r \le R_k$.

Учитывая (11), в каждом соотношении из (17) получаем

$$t = \frac{m\eta\beta\rho}{K(\rho-\rho_k)}\int_{r_c}^{r} \overline{r}\ln\frac{R_k}{\overline{r}}\,d\overline{r} =$$

$$= \frac{m\eta\beta\rho}{2K(\rho-\rho_k)}\left[\left(r^2\ln\frac{R_k}{r} - r_c^2\ln\frac{R_k}{r_c}\right) + \frac{r^2-r_c^2}{2}\right]. \tag{18}$$

Проведя аналогичные подсчеты, получаем

$$T = \frac{m\eta\beta\rho}{K(\rho_k-\rho)}\int_{r_c}^{R_K} r^2\ln\frac{R_k}{r}\,dr = \frac{m\eta\beta\rho}{2K(\rho-\rho)}\left[\frac{R_k^2-r_c^2}{2} - r_c^2\ln\frac{R_k}{r_c}\right]. \tag{19}$$

Выводы. 1. С уменьшением глубины залежи месторождения тяжелой нефти увеличивается вероятность того, что это месторождение является вязкопластичным.

2. Нефтяное месторождение с потоком фильтрации свободной поверхности можно эксплуатировать шахтным способом.

3. Решена гидродинамическая задача для случая плоскорадиального стационарного течения вязкопластичной сжимаемой жидкости со свободной текучестью, т. е. получены алгоритмы дебита массы и скорости фильтрации массы для скважины, дающей вязкопластичную сжимаемую нефть, а также алгоритм, определяющий закон распределения давления в дренажной зоне, который можно применить при решении задач по теории разработки нефтяных месторождений.

4. Получены алгоритмы для определения времени продвижения произвольной частицы жидкости от произвольной точки пласта до скважины и от контура питания до скважины.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Мирзаджанзаде А.Х., Ахмедов З.М., Алиев В.А. и др. Особенности разработки месторождений неньютоновских нефтей. М., ВНИИОЭНГ, 1971.

[2] Мирзаджанзаде А.Х., Ковалев А.Г., Зайцев Ю.В. Особенности эксплуатации месторождений аномальных нефтей. М., Недра, 1972.

[3] Огибалов П.М., Мирзаджанзаде А.Х. Нестационарные движения вязкопластичных сред. М., Изд-во МГУ, 1970.

[4] Пыхачев Г.Б., Исаев Р.Г. Подземная гидравлика. М., Недра, 1972.

[5] Пыхачев Г.Б. Подземная гидравлика. М., Гостопмехиздат, 1961.

[6] Басниев К.С., Власов А.М., Кочина И.Н. Подземная гидравлика. М., Недра, 1986.

[7] Мустафаев С.Д., Ибрагимов В.А., Гулиев Р.А. Плоско-радиальная нестационарная фильтрация сжимаемой вязкопластичной жидкости в сжимаемой пористой среде. *МНИЖ*, 2016, № 2-2, с. 33–36. DOI: 10.18454/IRJ.2016.44.147

[8] Мустафаев С.Д., Ибрагимов В.А., Казымов Ф.К. и др. Сферически-радиальная нестационарная фильтрация сжимаемой вязкопластичной жидкости в сжимаемой однородной пористой среде. *Известия технических учебных заведений Азербайджана*, 2016, № 2, с. 83–88.

[9] Mirzəcanzadə A.X., Əhmədov Z.M. Yeraltı hidroqazodinamika. Bakı, 1986.

Асланов Джамаладдин Нураддин оглы — доцент Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности (Азербайджанская Республика, Баку, AZ1010, пр-т Азадлыг, д. 20).

Мустафаев Сафа Дадаш оглы — доцент Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности (Азербайджанская Республика, Баку, AZ1010, пр-т Азадлыг, д. 20).

Ибрагимов Валех А. (1941–2017) — доцент, работал в Азербайджанском государственном университете нефти и промышленности (Азербайджанская Республика, Баку, AZ1010, пр-т Азадлыг, д. 20).

Алиева Ровшана Тариэль — старший лаборант Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности (Азербайджанская Республика, Баку, AZ1010, пр-т Азадлыг, д. 20).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Асланов Дж.Н., Мустафаев С.Д., Ибрагимов В.А. и др. Криволинейное радиальное течение сжимаемой вязкопластичной нефти со свободной текучестью в однородном пласте. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 3, с. 54–61. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-54-61

RADIAL CURVILINEAR MOTION IN A FREE FLOW OF COMPRESSIBLE VISCOPLASTIC OIL IN A HOMOGENEOUS FORMATION

Dzh.N. Aslanov tribo72@mail.ru
S.D. Mustafaev
V.A. Ibragimov
R.T. Aliyeva

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Republic of Azerbaijan

Abstract

The paper presents a solution to a steady-state hydrodynamic problem dealing with one-dimensional free-surface radial flow of compressible viscoplastic oil in a horizontal homogeneous circular formation. A vertical producing oil well is located in the centre of the formation, penetrating the pay zone fully, with no well casing or perforation present. We used generalised Darcy's law and equations of state for a compressible fluid to determine mass flow rate of the compressible viscoelastic oil and derive equations for current density, oil flow rate, current pressure distribution in the drainage area, and current pressure gradient. The equations take into account oil compressibility and initial pressure gradient. We also determined the time it takes an oil particle to reach the well starting from the current radius vector and from the external boundary. This is the case when the oil deposit lies close to the earth surface. This depth range features no shale beds or interbedded formations. Since subsurface mining is possible with shallow oil deposits, both wells and tunnels may be used for production

Keywords

Free flow, viscoplastic oil, one-dimensional radial flow, mass flow rate, fluid equation of state, oil shrinkage factor, current radius vector, pressure gradient, oil mass flow rate

Received 16.10.2017
© Author(s), 2019

REFERENCES

[1] Mirzadzhanzade A.Kh., Akhmedov Z.M., Aliev V.A., et al. Osobennosti razrabotki mestorozhdeniy nen'yutonovskikh neftey [Special aspects of non-newtonian oil fields exploitation]. Moscow, VNIIOENG Publ., 1971.

[2] Mirzadzhanzade A.Kh., Kovalev A.G., Zaytsev Yu.V. Osobennosti ekspluatatsii mestorozhdeniy anomal'nykh neftey [Special aspects of anomalous oil exploitation]. Moscow, Nedra Publ., 1972.

[3] Ogibalov P.M., Mirzadzhanzade A.Kh. Nestatsionarnye dvizheniya vyazko plastichnykh sred [Non-stationary motion of viscoplastic medium]. Moscow, Izd-vo MGU Publ., 1970.

[4] Pykhachev G.B., Isaev R.G. Podzemnaya gidravlika [Underground hydraulics]. Moscow, Nedra Publ., 1972.

[5] Pykhachev G.B. Podzemnaya gidravlika [Underground hydraulics]. Moscow, Gostopmekhizdat Publ., 1961.

[6] Basniev K.S., Vlasov A.M., Kochina I.N. Podzemnaya gidravlika [Underground hydraulics]. Moscow, Nedra Publ., 1986.

[7] Mustafaev S.D., Ibragimov V.A., Guliev R.A. Flat-radial unsteady filtration of incompressible viscous-plastic fluid in a compressible porous medium. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2016, № 2-2, pp. 33–36 (in Russ.). DOI: 10.18454/IRJ.2016.44.147

[8] Mustafaev S.D., Ibragimov V.A., Kazymov F.K., et al. Spherical-radial unsteady filtration of incompressible viscous-plastic fluid in a compressible porous medium. *Izvestiya tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy Azerbaydzhana*, 2016, no. 2, pp. 83–88 (in Russ.).

[9] Mirzəcanzadə A.X., Əhmədov Z.M. Yeraltı hidroqazodinamika [Underground hydrogecodynamics]. Bakı, 1986.

Aslanov Dzh.N. — Assoc. Professor, Azerbaijan State Oil and Industry University (Azadlig prospekt 20, Baku, AZ1010 Republic of Azerbaijan).

Mustafaev S.D. — Assoc. Professor, Azerbaijan State Oil and Industry University (Azadlig prospekt 20, Baku, AZ1010 Republic of Azerbaijan).

Ibrahimov V.A. (1941–2017) — Assoc. Professor, worked in Azerbaijan State Oil and Industry University (Azadlig prospect 20, Baku, AZ1010 Republic of Azerbaijan).

Aliyeva R.T. — Senior Assistant, Azerbaijan State Oil and Industry University (Azadlig prospekt 20, Baku, AZ1010 Republic of Azerbaijan).

Please cite this article in English as:

Aslanov Dzh.N., Mustafaev S.D., Ibragimov V.A. et al. Radial curvilinear motion in a free flow of compressible viscoplastic oil in a homogeneous formation. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 3, pp. 54–61 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-54-61