



УДК 532.5.032

ОДНОФАЗНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В НАСЫЩЕННОЙ АНОМАЛЬНО ТЕРМОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ¹

С. Ф. Хизбуллина

Институт механики УНЦ РАН, Уфа

Аннотация. В работе численно моделируется однофазная фильтрация anomalно термовязкой жидкости на примере термообратимой гелеобразующей композиции МЕТКА. Исследуются особенности фильтрационного течения жидкости при ее закачке в пористую среду. Построены характерные картины распределения полей физических величин (температуры, вязкости и компонент вектора скорости) при использовании граничных условий первого и третьего рода.

Ключевые слова: однофазная фильтрация, anomalно термовязкая жидкость

1. Введение

В последнее время для повышения нефтеотдачи пластов широко используются различные химические реагенты. На многих месторождениях проводятся работы по закупориванию каналов за счет закачивания гелевых, осадкообразующих и вязжущих композиций, составляющих основу потокоотклоняющих технологий. Кроме того, в России и за рубежом

¹ Работа выполнена в рамках Программы целевых расходов Президиума РАН «Поддержка молодых ученых» и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08–08–12058–офи).

неуклонно возрастает доля месторождений высоковязких нефтей и битумов, добыча которых тесно связана с проблемой фильтрации аномально термовязких сред.

Ранее в работе [1] было проведено численное исследование особенностей фильтрационного течения жидкости с модельной немонотонной зависимостью вязкости от температуры. Было показано, что многообразие гидродинамических эффектов, обнаруженных при течении модельной жидкости в плоском [2] и цилиндрическом [3] каналах, имеют место и при фильтрации. Процесс фильтрации определяется характером преодоления жидкостью зоны немонотонного изменения вязкости.

2. Постановка задачи

Для численного исследования процесса фильтрации аномально термовязкой жидкости, то есть жидкости, вязкость которой зависит от температуры немонотонным образом, рассмотрим горизонтальный пористый насыщенный аномально термовязкой жидкостью пласт мощностью H . Пласт пробурен нагнетательной скважиной. Ось скважины принимается за ось цилиндрической системы координат. На скважине радиуса R_c поддерживается постоянное забойное давление p_c . Контур питания удален от скважины на расстоянии R_k и на нем поддерживается постоянное давление p_k . Будем считать, что кровля и подошва пласта непроницаемы. $L = R_k - R_c$ — длина рассматриваемого участка пласта. Полагается, что аномально термовязкая жидкость закачивается в пласт с постоянной температурой T_{in} . Первоначальная пластовая температура равна T_0 .

Математическая модель неустановившейся однофазной фильтрации упругой слабосжимаемой аномально термовязкой жидкости в упругой пористой среде состоит из уравнения неразрывности, записанного в виде уравнения пьезопроводности (1), уравнений движения в виде линейного закона Дарси (2) и уравнения притока тепла (3), которые в осесимметричной постановке имеют вид:

$$\beta^* \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{k}{\mu(T)} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{\mu(T)} \frac{\partial p}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$u = -\frac{k}{\mu(T)} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad w = -\frac{k}{\mu(T)} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (CT)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho_f c_f u T - r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_f c_f w T - \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0, \quad (3)$$

где p — давление; u и w — радиальная и осевая компоненты скорости фильтрации жидкости; T — температура; t — время; $C = m \rho_f c_f +$

$[1 - m]\rho_r c_r$ — объемная теплоемкость насыщенной пористой среды; $\lambda = m\lambda_f + [1 - m]\lambda_r$ — коэффициент теплопроводности насыщенной пористой среды; ρ , λ , c — плотность, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость (индекс « f » относится к флюиду, « r » — к скелету пористой среды); β^* — коэффициент упругоэластичности пласта; $\mu(T)$ — функция зависимости динамической вязкости от температуры.

Начальные условия поставим, используя следующие предположения:

- жидкость в пласте покоится:

$$u|_{t=0} = w|_{t=0} = 0; \quad (4)$$

- давление в пласте постоянно и равно пластовому:

$$p|_{t=0} = p_k; \quad (5)$$

- температура в пласте постоянна и равна пластовой:

$$T|_{t=0} = T_0. \quad (6)$$

Граничные условия для скорости, давления и температуры запишутся следующим образом:

- на контуре питания ($r = R_k$):

$$p|_{r=R_k} = p_k, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_k} = 0; \quad (7)$$

- на забое ($r = R_c$):

$$\begin{aligned} T|_{r=R_c} &= T_{in}, \\ p|_{r=R_c} &= p_c; \end{aligned} \quad (8)$$

- на кровле и подошве ($z = 0$ и $z = H$):

$$u|_{z=0} = u|_{z=H} = 0, \quad w|_{z=0} = w|_{z=H} = 0, \quad \left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{z=H} = 0. \quad (9)$$

Для температуры на кровле и подошве пласта будем использовать два вида граничных условий [4]:

- кровля и подошва имеют постоянную температуру T_0 (граничные условия первого рода)

$$T|_{z=0} = T|_{z=H} = T_0; \quad (10)$$

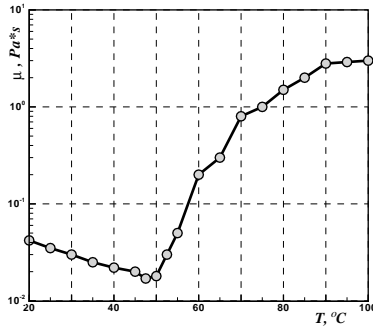


Рис. 1. Зависимость динамической вязкости от температуры для композиции МЕТКА

- учет ухода тепла по схеме Ловерье (граничные условия третьего рода):

$$q_z = -\lambda_{\text{ТК}} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = -\frac{\lambda_{\text{ТК}}(T-T_0)}{\sqrt{\pi t} \varkappa_{\text{ТК}}},$$

$$q_z = -\lambda_{\text{ТК}} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{z=H} = \frac{\lambda_{\text{ТК}}(T-T_0)}{\sqrt{\pi t} \varkappa_{\text{ТК}}},$$
(11)

где $\lambda_{\text{ТК}}$ — коэффициент теплопроводности горных пород кровли и подошвы пласта; $\varkappa_{\text{ТК}}$ — коэффициент температуропроводности тех же пород.

Таким образом уравнения (1)–(3), дополненные начальными (4)–(6) и граничными (7)–(11) условиями, полностью описывают фильтрацию жидкости в насыщенной пористой среде. Далее полученные нестационарные уравнения и условия математической модели приводились к безразмерному виду и решались численно. Численный метод решения системы уравнений был протестирован путем сравнения с точным аналитическим решением для плоскорадиальной фильтрации упругой жидкости по линейному закону Дарси [5].

3. Результаты численного исследования

Для численного исследования процесса фильтрации рассмотрим жидкость с зависимостью динамической вязкости от температуры, представленной на Рис. 1 и характерной для термообратимой гелеобразующей композиции МЕТКА [6].

В данной работе использовались следующие значения параметров: первоначальная температура пласта $T_0 = 70^\circ\text{C}$, температура закачи-

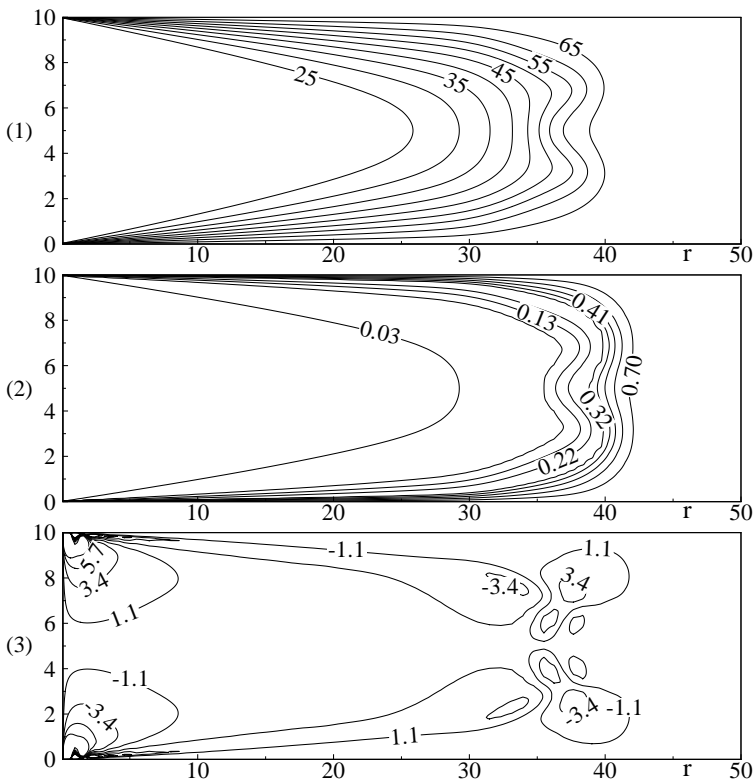


Рис. 2. Изолинии распределения температуры (1), вязкости (2) и осевой скорости фильтрации (3) для композиции МЕТКА в однородном пласте при постоянной температуре кровли и подошвы

ваемой жидкости $T_{in} = 20^\circ\text{C}$, радиус скважины $R_c = 0.073$ м, радиус контура питания $R_k = 50$ м, забойное давление $p_c = 20$ МПа, давление на контуре питания $p_k = 5$ МПа, пористость $m = 0.2$, проницаемость $k = 10^{-12}$ м².

На Рис. 2 и Рис. 3 представлены характерные изолинии распределения температуры, вязкости и осевой скорости фильтрации для композиции МЕТКА при постоянной температуре кровли и подошвы и при задании оттока тепла через кровлю и подошву по схеме Ловерье.

В большей части пласта распределение температурного поля (Рис. 2(1)) характерно для фильтрации жидкости с постоянной вязкостью. Однако при температуре $T = 47.5^\circ\text{C}$, при которой композиция

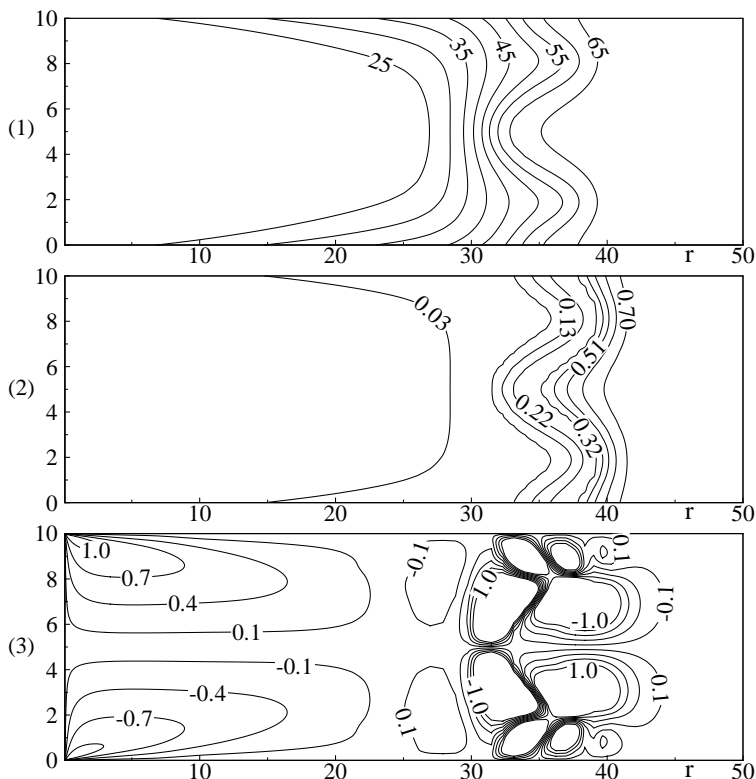


Рис. 3. Изолинии распределения температуры (1), вязкости (2) и осевой скорости фильтрации (3) для композиции МЕТКА в пласте при задании оттока тепла через кровлю и подошву по схеме Ловерье

МЕТКА имеет минимальную вязкость, изолинии температуры начинают искривляться. Значения вязкости композиции, следуя за характером распределения температурного поля (Рис. 2(1)), образуют в направлении потока зону немонотонного изменения вязкости — «вязкий барьер» (Рис. 2(2)). В отличие от фильтрации жидкости с постоянной вязкостью эпюры радиальной скорости фильтрации изменяются и возникает осевая скорость фильтрации (Рис. 2(3)). Следует заметить, что на Рис. 2(3) и Рис. 3(3) значения осевой скорости фильтрации представлены как $w \cdot 10^{-8}$.

В случае задания оттока тепла по схеме Ловерье вид вязкого барьера меняется: изолинии вязкости (Рис. 3(2)) пересекают пласт по всей тол-

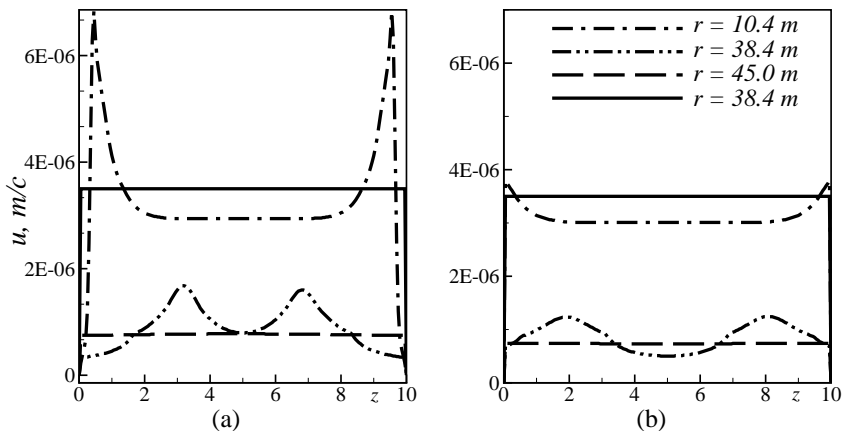


Рис. 4. Профили радиальной скорости фильтрации композиции МЕТКА и жидкости с постоянной вязкостью (сплошная линия) на различных расстояниях от оси скважины: а) при постоянной температуре кровли и подошвы; б) при задании оттока тепла через кровлю и подошву по схеме Ловерье

щине, что связано с типом граничных условий для температуры. Значения осевой скорости фильтрации в случае задания оттока тепла через кровлю и подошву оказываются меньше, чем в случае задания постоянной температуры.

На Рис. 4 показаны эпюры радиальной скорости фильтрации для композиции МЕТКА на различных расстояниях от оси скважины для граничных условий первого и третьего рода.

В случае граничного условия первого рода (Рис. 4(а)) на расстоянии $r = 10.4$ м от оси скважины большую часть сечения пласта ($2 < z < 8$) занимает жидкость, имеющая температуру закачки (Рис. 2), и, следовательно, радиальная скорость фильтрации в этой области постоянна. Более чем двукратное увеличение радиальной скорости фильтрации вблизи кровли и подошвы пласта можно объяснить образующейся в этом сечении областью маловязкой жидкости.

Сечение $r = 38.4$ м соответствует средней части образовавшегося в пласте вязкого барьера. Хорошо видно, что пики радиальной скорости фильтрации сместились к середине пласта. Вблизи кровли и подошвы жидкость имеет температуру большую, чем в средней части пласта (Рис. 2), в связи с чем радиальная скорость фильтрации оказывается

меньше. Кроме того, на Рис. 4(а) сплошной кривой показана эпюра радиальной скорости на расстоянии $r = 38.4$ м от оси скважины при фильтрации жидкости с постоянной вязкостью. Видно, что на одном и том же расстоянии от оси скважины ($r = 38.4$ м) значения радиальной скорости фильтрации для жидкости с постоянной вязкостью и для жидкости с немонотонной зависимостью вязкости от температуры различаются. Причем для композиции МЕТКА скорость фильтрации меньше.

На достаточном удалении от оси скважины ($r = 45.0$ м), куда еще не дошел температурный фронт, жидкость имеет пластовую температуру, вязкость в сечении постоянна и эпюра скорости имеет вид, характерный для изотермической фильтрации. Разница между минимальным и максимальным значениями радиальной скорости фильтрации на одном и том же расстоянии от оси скважины уменьшается с увеличением расстояния от оси скважины.

При граничных условиях третьего рода все описанные особенности эпюры радиальной скорости фильтрации сохраняются. Следует также отметить, что при этом абсолютная величина радиальной скорости фильтрации в области немонотонного изменения вязкости оказывается меньше, чем при граничном условии первого рода, что объясняется формой образующегося вязкого барьера.

При численном моделировании фильтрации термообратимой гелеобразующей композиции МЕТКА установлено образование неоднородного профиля радиальной скорости вблизи кровли и подошвы пласта, наиболее выраженной при граничных условиях с первого рода. Показано, что для адекватного описания процесса закачки гелеобразующих композиций в расчетах необходим учет зависимости вязкости от температуры.

Список литературы

- [1] Хизбуллина С. Ф. Фильтрация anomalно термовязкой жидкости в слоисто-неоднородном пласте // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. Вып. 4 / Под. ред. С. Ф. Урманчеева, С. В. Хабирова. Уфа: Гилем, 2007. С. 251–257.
- [2] Урманчеев С. Ф., Киреев В. Н. Установившееся течение жидкости с температурной аномалией // Доклады академии наук. 2004. Т. 396, № 2. С. 204–207.
- [3] Киреев В. Н., Урманчеев С. Ф., Хизбуллина С. Ф. Математическое моделирование течения anomalно термовязкой жидкости в цилиндрическом канале // Труды 4-ой Российской национальной конференции по теплообмену в 8 томах. Т. 2. Вынужденная конвекция

- однофазной жидкости. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. С. 145–148.
- [4] Желтов Ю. П. Разработка нефтяных месторождений: Учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 332 с.
- [5] Басниев К. С., Дмитриев Н. М., Розенберг Г. Д. Нефтегазовая гидромеханика // Учебное пособие для вузов. М.: Ижевск. Институт компьютерных исследований. 2005. 544 с.
- [6] Алтунина Л. К., Кувшинов В. А., Стасьева Л. А. Исследование кинетики гелеобразования и реологических характеристик термообратимых полимерных систем применительно к условиям месторождений АНК «ЮКОС» // Башкирский химический журнал. 2001. Т. 8, № 2. С. 53–57.