

УДК 532.5

## Распределение температуры по пласту при фильтрации вязкопластичной нефти

Н.Н. Морозкин

Башкирский государственный университет

*Аннотация:* 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

### 1. 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 таких жидкостей значительно возрастает (в данной работе предполагается что скорость возрастает в 100 раз). Существуют различные способы моделирования течения таких жидкостей, так в работе [1] считается, что до преодоления градиента сдвига скорость фильтрации нефти равно нулю, таким образом образуются две зоны: зоны фильтрации и застойная зона. Однако, как указано в работах [2,3] реальная нефть течет и до преодоления градиента сдвига, хотя и очень медленно. Существует большое количество способов моделирования такого поведения нефти, обзор некоторых из них приведен в работе [4]. В работе используется способ моделирования скорости фильтрации, связанный с зависимостью вязкости от градиента давления, также представленный в работе [4].

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 энергии, 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 поле давления, поле скорости и других гидродинамических параметров в случае стационарного уравнения пьезопроводности представлены в работе [6], работа [7] посвящена особенностям фильтрации вязкопластичной нефти в нестационарном

случае.

## 2. Постановка задачи

Математическая модель радиально симметричного процесса фильтрации описывается следующим уравнением:

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

Здесь  $m$  – пористость среды;  $p$  – давление;  $t$  – время;  $r$  – текущий радиус;  $\rho(p)$  – 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).

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

Здесь  $k$  – проницаемость;  $\mu$  – вязкость;

Зависимость вязкости от градиента давления будет иметь вид (4)

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

$G$  – градиент сдвига (предельный градиент давления) Здесь  $\mu_H$  – вязкость до преодоления предельного градиента давления;  $\mu_L$  – вязкость после преодоления предельного градиента давления;  $glad$  – параметр который математический отвечает за гладкость функции вязкости, а физический за скорость разрушения структуры нефти. В [2] указаны преимущества данного способа моделирования.

Ограничения на переменные имеет вид (5)

$$\begin{aligned} R_w < r < R_k \\ 0 < t \leq t_k \end{aligned} \quad (5)$$

Начальное условие будет иметь вид (6)

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

Граничные условия будут иметь вид (7)

$$\begin{aligned} p(R_w, t) &= P_w \\ p(R_k, t) &= P_0 \end{aligned} \quad (7)$$

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

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

Здесь  $c_p$  – теплоемкость среды;  $\lambda$  – теплопроводность среды;  $\eta$  – адиабатический коэффициент;  $\xi$  – коэффициент Джоуля-Томсона;  $m$  – пористость  $c_{sk}$  – теплоемкость пористой среды;  $\rho$  – плотность жидкости;  $\rho_{sk}$  – 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)

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(R_w, t)}{\partial r} &= 0 \\ T(R_k, t) &= T_0 \end{aligned} \quad (10)$$

**Задача.** Получить графики распределения температуры по пласту для различных времен протекания процесса фильтрации и провести их анализ.

### 3. Разностная схема

Уравнение на давления аппроксимируется неявной схемой (11)

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

Уравнение на температуру аппроксимируется неявной схемой (12)

$$\begin{aligned} [m\rho_i^j c_p + (1-m)\rho_{sk} c_{sk}] \frac{T_i^j - T_i^{j-1}}{\tau} &= \lambda \frac{1}{r_i} \frac{1}{h} \left[ (r)_{i+1/2} \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{h} - (r)_{i-1/2} \frac{T_i^j - T_{i-1}^j}{h} \right] - \\ - \rho_i^j C_p \frac{k}{\mu(p_{i+1}, p_i)} \frac{p_{i+1}^j - p_i^j}{h} \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{h} &+ \eta m \rho_i^j C_p \frac{p_i^j - p_i^{j-1}}{\tau} - \xi \rho_i^j C_p \frac{k}{\mu(p_{i+1}, p_i)} \left( \frac{p_{i+1}^j - p_i^j}{h} \right)^2 \end{aligned} \quad (12)$$

Аппроксимация вязкости осуществляется по разностной формуле (13)

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

Где,  $h$  - шаг по времени  $\tau$  - шаг по пространству.

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

### 4. Входные данные

$R_w = 0.1$  м;  $R_k = 100$  м;  $\beta = 10^{-8}$  1/Па;  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>  $P_0 = 10$   $P_w = 5$  МПа;  $\mu_H = 0.1$  Па·с;  $G = 1.5 \cdot 10^5$  Па/м;  $\mu_L = 0.001$  Па·с;  $glad = 10$  м/атм;

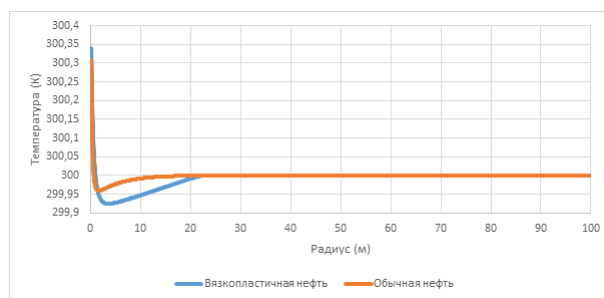
$T_0 = 300$  К;  $T_{Rk} = 300$  К;  $c_p = 800$  Дж/(кг·К);  $\rho_{sk} = 2300$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_{sk} = 450$  Дж/(кг·К);  $\lambda = 2.5$  Вт/(м·К);  $\eta = 1.7 \cdot 10^{-7}$  К/Па;  $\xi = 4.5 \cdot 10^{-7}$  К/Па.

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

### 5. Результаты расчетов

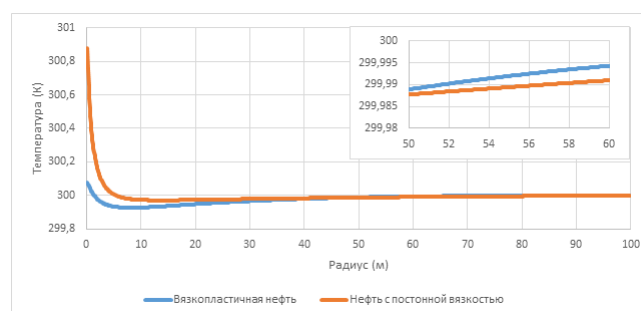
Данные по гидродинамической части исследования были опубликованы в более ранних работах. Рассмотрим получившиеся графики распределения температурного поля по пласту.

Сравним кривые распределения температуры ньютоновской и вязкопластичной нефтей. Как видим на рисунке 1. вблизи скважины 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.



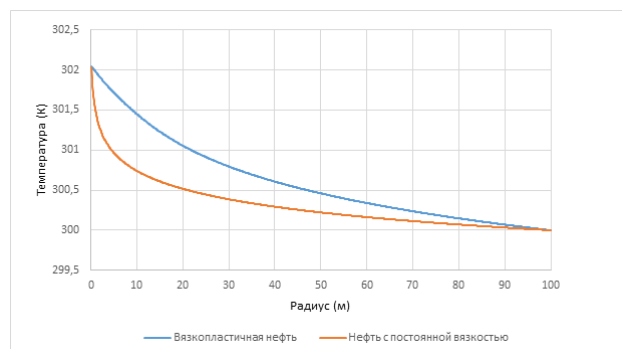
**Рис. 1.** Распределение температуры по пласту при фильтрации вязкопластичной и обычной нефти в момент времени 2.4 часа

Как видим на рисунке 2, график температуры по пласту при фильтрации вязкопластичной нефти расположен выше в первой половине пласта. Наибольшая разница температур достигается вблизи скважины. В правом верхнем углу рисунка увеличена область от 50 до 60 метров по радиусу пласта. Видно что в этой области температура вязкопластичной нефти больше температуры обычной нефти. Данное явление можно объяснить преобладанием адиабатического эффекта для ньютоновской нефти в данной области.

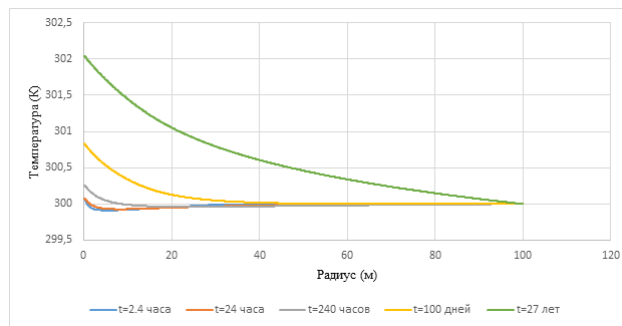


**Рис. 2.** Распределение температуры по пласту при фильтрации вязкопластичной и обычной нефти в момент времени 24 часа

На рисунке 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. 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 рисунке 4 представлены графики распределения температуры по пласту во времени. Рассмотрев рисунок 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 рисунки 3 и 4, можно сделать вывод, что в момент времени 27 лет температура вязкопластичной нефти практически совпадает с стационарным случаем.

## 6. Заключение

По поставленной задаче был проведен расчет, результаты проанализированы. Как видно, в момент времени 2,4 часа для представленных входных данных температура вязкопластичной нефти больше в начале, но меньше на некотором отдалении от скважины. В момент времени 24 часа температура вязкопластичной нефти в первой половине пласта меньше температуры обычной нефти, во второй половине пласта наблюдается обратная картина. В стационарном режиме температура вязкопластичной нефти всюду меньше температуры нефти с постоянной вязкостью, за исключением границ.

## Литература

1. Хайдар А. М. Расчетные исследования фильтрации вязкопластичной нефти при электромагнитном нагреве // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2006. № 1. URL: [http://ogbus.ru/authors/Haidar/Haidar\\_1.pdf](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., Кабилов 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 Башкирского университета. 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 // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. №3. С.185-207. URL: [http://ogbus.ru/issues/3\\_2015/ogbus\\_3\\_2015\\_p185-207\\_MorozkinNN\\_ru\\_en.pdf](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 Башкирского университета. 2013, Т.18, №4, С. 965–968.

MSC 86-04

## Temperature distribution over the reservoir during viscoplastic oil filtration

N.N. Morozkin

Bashkir State University

*Abstract:* The process of viscoplastic oil filtration is considered in this article. To model the viscoplastic properties of oil, we use a model in which the viscosity depends on the pressure gradient. We use a system from the equations of conductivity and energy, to simulate the process of non-isothermal filtration. In this case, the energy equation takes into account the adiabatic effect and the Joule-Thomson effect. The paper presents the equations for calculating, there is a numerical scheme and input data. We performed calculations for different times of the filtration process. The graphs of temperature distribution over the reservoir for the case of viscoplastic and common oils are given.

*Keywords:* Non-isothermal filtration, the dependence of viscosity on pressure gradient, shear gradient, limiting gradient, abnormal oil, viscoplastic oil, high-viscosity oil, thermometry

### References

1. Khaydar A. M. Raschetnyye issledovaniya fil'tratsii vyazkoplastichnoy nefti pri elektromagnitnom nagreve [Calculation studies of viscoplastic oil filtration under electromagnetic heating] // Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoye delo» [Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"]. 2006. No. 1. URL: [http://ogbus.ru/authors/Haidar/Haidar\\_1.pdf](http://ogbus.ru/authors/Haidar/Haidar_1.pdf)
2. Alishayev M. G., Rozenberg M. D., Teslyuk Ye. V. Neizotermicheskaya fil'tratsiya pri razrabotke neftnyanykh mestorozhdeniy [Non-isothermal filtration in the development of oil fields] // M.: Nedra [M.: Bosom], 1985. 270 p.
3. Devlikamov V.V., Khabibullin Z.A., Kabirov M.M. Anomal'nyye nefti [Abnormal oil] // M.: Nedra [M.: Bosom], 1975. 168 p.
4. Morozkin N.N. Modelirovaniye protsessa fil'tratsii vyazkoplastichnoy nefti s uchetom zavisimosti vyazkosti ot gradiyenta davleniya [Modeling of the process of viscoplastic oil filtration taking into account the dependence of viscosity on the pressure gradient] // Vestnik Bashkirskogo universiteta [Vestnik of the Bashkir University]. 2014. V. 19, No. 3. P. 781-784.
5. Chekaluk A.B. Termodinamika neftyanogo plasta [Thermodynamics of the oil reservoir] // M.: Nedra [M.: Bosom], 1965. 232 p.
6. Morozkin N.N., Istrafilev M.Ya. Raschet gidrodinamicheskikh parametrov pri fil'tratsii vyazkoplastichnoy nefti v statsionarnom sluchaye [Calculation of hydrodynamic parameters for the filtration of viscoplastic oil in the stationary case] // Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoye delo» [Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"]. 2015. No. 3. P. 185-207. URL: [http://ogbus.ru/issues/3\\_2015/ogbus\\_3\\_2015\\_p185-207\\_MorozkinNN\\_ru\\_en.pdf](http://ogbus.ru/issues/3_2015/ogbus_3_2015_p185-207_MorozkinNN_ru_en.pdf)

7. Morozkin N.N. Issledovaniye protsessa nestatsionarnoy fil'tratsii vyazkoplachichnoy nefti [Investigation of the process of non-stationary filtration of viscoplastic oil] // Neftyanoye khozyaystvo [Oil industry]. 2016, No. 6. P. 112-114.
8. Sadretdinov A.A. Neizotermicheskaya fil'tratsiya szhimayemogo flyuida v sisteme skvazhina-plast [Non-isothermal filtration of compressible fluid in the well-reservoir system] // Dissertatsiya kandidata fiziko-matematicheskikh nauk [Thesis of the candidate of physical and mathematical sciences]. Ufa. 2011. 125 p.
9. Morozkin N.N., Sadretdinov A.A. Resheniye odnoy zadachi fil'tratsii s ispol'zovaniyem neravnomernykh setok po prostranstvu [Solution of one filtration problem using non-uniform grids over space] // Vestnik Bashkirskogo universiteta [Vestnik of the Bashkir University]. 2013. V. 18, No. 4. P. 965-968.