

УДК 532.546:550.820.7

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ФИЛЬТРАТА БУРОВОГО РАСТВОРА НА УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛАСТА, НАСЫЩЕННОГО НЕФТЬЮ И ГАЗОМ

В. И. Пеньковский, Н. К. Корсакова, Г. В. Нестерова\*

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

\* Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

E-mails: penkov@hydro.nsc.ru, kors@hydro.nsc.ru, NesterovaGV@ipgg.sbras.ru

С учетом высокой скорости теплообмена между флюидами и скелетом породы построена математическая модель процесса осесимметричного распределения фаз в зоне проникновения фильтрата водных глинистых растворов в продуктивный пласт, поровое пространство которого может содержать одновременно три несмешивающихся флюида: нефть, газ и природную воду. Показано, что удельное электрическое сопротивление зоны проникновения зависит не только от ее насыщенности флюидами и концентрации солей в водной фазе, но и от температуры фильтрата. Также показано, что на тепловом фронте образуется скачок насыщенности пласта нефтью.

**Ключевые слова:** зона проникновения, фильтрация несмешивающихся жидкостей, тепловой фронт, удельное электрическое сопротивление.

**Введение.** В процессе несмешивающейся фильтрации изменение температуры влияет на величину отношения вязкости воды и вязкости нефти  $\alpha = \mu_1/\mu$ . Это отношение входит в потоковую функцию Леверетта, определяющую скорости движения фаз. Основное изменение претерпевает вязкость нефти  $\mu$ . Вследствие наличия геотермического градиента температура земных слоев возрастает с увеличением глубины и на глубине 2000–3000 м составляет приблизительно 60–80 °С. Вязкость природной нефти и степень ее зависимости от температуры существенно определяются ее химическим составом. В общем случае данная зависимость нелинейна и может меняться в широком диапазоне [1, 2]. Простейшими аппроксимациями такой зависимости в пределах выделенных областей могут служить линейные функции или формула Вальтера [3].

Пусть  $T_p$  — температура пласта, а  $T_0$  — температура фильтрата. Случай  $T_0 < T_p$  соответствует охлаждению зоны вблизи скважины вследствие проникновения фильтрата бурового раствора, температура которого ниже температуры пластовой воды, случай  $T_0 > T_p$  — вытеснению нефти горячей водой с целью повышения нефтеотдачи пласта. Важные характеристики двухфазного течения непосредственно определяются свойствами функции Леверетта  $F(s; \alpha(T))$  и ее производной по насыщенности  $F'_s(s; \alpha(T))$  [3].

В частности, если интервал изменения насыщенности  $(0, s^0)$ , где  $s^0$  — начальная насыщенность нефтью в пласте, содержит точку максимума функции  $F'_s(s; \alpha(T))$ , то распреде-

---

Работа выполнена в рамках Междисциплинарного проекта СО РАН № 89.

© Пеньковский В. И., Корсакова Н. К., Нестерова Г. В., 2014

ление насыщенности будет претерпевать разрыв. В этом случае с учетом кинематического условия на подвижном фронте

$$m(s^0 - s_f) \frac{dx_f}{dt} = v(x_f - 0, t) - v(x_f + 0, t)$$

( $m, t, x_f, v$  — пористость, время, координата фронта и скорость нефти соответственно) насыщенность на фронте разрыва  $s_f$  определяется из трансцендентного уравнения

$$s_f(\alpha(T)) = s^0 - [F(s^0, \alpha(t)) - F(s_f, \alpha(T))]/F'_s(s_f; \alpha(T)),$$

а среднюю по области вытеснения насыщенность нефтью в зоне проникновения для случая осесимметричного движения можно вычислить по формуле

$$\langle s(\alpha) \rangle = \frac{1}{x_f - 1} \int_1^{x_f} s(x, t) dx = s_f - \frac{F(s_f)}{F'_s(s_f)}.$$

Очевидно, что вследствие изменения вязкости флюидов эти характеристики зависят от температуры проникающей в пласт воды и температуры самого пласта, насыщенного флюидами.

**Основные уравнения. Постановка задачи, алгоритм решения.** В случае трехфазного движения необходимо ввести две обобщенные потоковые функции Леверетта, определяемые соотношениями

$$F_i(s, s_0; \alpha_i) = \alpha_i f_i(s_i) / \sum_i \alpha_i f_i(s_i),$$

$$\sum_i F_i(s, s_0; \alpha_i) = 1, \quad \alpha_i = \frac{\mu_1}{\mu_i}, \quad \alpha_1 = 1, \quad \alpha \leq 1, \quad \alpha_0 \gg 1.$$

Скорости фаз зависят от фазовых проницаемостей  $f_i(s_i)$  и в случае осесимметричного движения выражаются формулами  $rv_i = F(s, s_0; \alpha_i)r_w V(t)$ , где  $r$  — радиальная координата;  $r_w$  — радиус скважины;  $V(t)$  — суммарная скорость фаз. В независимых переменных  $\tau, x$  уравнения сохранения массы аналогичны уравнениям одномерного движения

$$\frac{\partial s_i}{\partial \tau} + \frac{\partial F_i}{\partial x} = 0, \quad \tau = \frac{2}{mr_w} \int_0^t V(t) dt, \quad x = \left(\frac{r}{r_w}\right)^2, \quad i = 0, 1.$$

Вследствие сравнительно малой динамической вязкости газа его подвижность значительно превышает подвижность воды и нефти, поэтому рассмотрим случай, когда при проникновении воды в пласт фронт вытеснения газа находится перед фронтом вытеснения нефти ( $x_f < x_{f0}$ ). Для основных характеристик течения в зоне проникновения получаем следующие соотношения [5]:

$$x(s, \tau) = 1 + \frac{\tau \partial F(s, \langle s_0 \rangle; \alpha)}{\partial s}, \quad 0 < s < s_f,$$

$$s_f = s^0 + \frac{F(s_f, \langle s_0 \rangle; \alpha) - F(s^0, \langle s_0 \rangle; \alpha)}{\partial F(s_f, \langle s_0 \rangle; \alpha) / \partial s}, \quad (1)$$

$$\langle s \rangle = s_f - \frac{F(s_f, \langle s_0 \rangle; \alpha)}{\partial F(s_f, \langle s_0 \rangle; \alpha) / \partial s}, \quad x_n = \left(\frac{r_n}{r_w}\right)^2 = 1 + \tau.$$

Здесь  $\langle s_0 \rangle$  — остаточная насыщенность газом зоны проникновения;  $r_n = 1 + \tau$  — радиус объемного проникновения. Поскольку насыщенный флюидами пласт является гетерогенной сплошной средой, будем полагать, что теплообмен внутри пор между флюидами

и пористым скелетом происходит с достаточно высокой скоростью и его можно описать уравнением кинетики

$$\alpha_T \frac{\partial T_p}{\partial t} = T_0 - T_p, \quad (2)$$

где  $\alpha_T$  — малый параметр;  $T_p$  — температура скелета пористой среды с содержащимися в нем неподвижными жидкостями;  $T_0$  — температура подвижных флюидов. Такой подход существенно отличается от модели несмешивающейся фильтрации с учетом изменения температуры [6].

Теплоперенос, осуществляемый тремя несмешивающимися фазами (водой, газом и нефтью), без учета передачи тепла в продольном направлении описывается уравнением

$$(v_1 c_1 \rho_1 + v_0 c_0 \rho_0 + v c \rho) \frac{\partial T_0}{\partial x} + m(c_1 s_1 \rho_1 + c_0 s_0 \rho_0 + c s \rho) \frac{\partial T_0}{\partial t} + (1 - m) c_c \rho_c \frac{\partial T_p}{\partial t} = 0. \quad (3)$$

Здесь  $c$ ,  $c_1$ ,  $c_0$ ,  $c_c$ ,  $\rho$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_0$ ,  $\rho_c$  — удельные теплоемкости и плотности нефти, воды, газа и скелета среды соответственно;  $1 - m$  — доля скелета в единичном объеме физического пространства.

При решении системы уравнений (2), (3) используем асимптотическое разложение решения по степеням малого параметра  $\alpha_T$ , ограничившись первым приближением [7]. В сделанных допущениях для определения границы охлаждения (нагрева) зоны проникновения  $x_T$  достаточно составить интегральный баланс тепла.

На рис. 1 представлены два состояния гетерогенной системы пласта при проникновении в него воды с заданной температурой  $T_0$ . В состоянии I тепловое взаимодействие отсутствует. Общее теплосодержание  $Q$  в зоне проникновения описывается формулой

$$Q = (1 - m) c_c \rho_c T_p x_{f0}(t) + m c \rho T_p \int_1^{x_f} s dx + m c_1 \rho_1 T_0 \int_1^{x_f} (1 - s - \langle s_0 \rangle) dx + \\ + (x_{f0} - x_f) [s^0 m c \rho T_p + m c_1 \rho_1 T_0 (s_0^0 - \langle s_0 \rangle) + m c_1 \rho_1 T_p (1 - s_0 - s_0^0) + m c_0 \rho_0 T_p \langle s_0 \rangle]. \quad (4)$$

В состоянии II, соответствующем мгновенному установлению теплового равновесия в порах (коэффициент  $\alpha_T$  в уравнении кинетики обмена теплом бесконечно мал), в отсутствие передачи тепла в продольном направлении появляется подвижная граница  $x = x_T(\tau)$  теплового воздействия на пласт. В этом состоянии для общего теплосодержания получаем

$$Q = (1 - m) c_c \rho_c T_0 x_T + m c \rho T_0 \int_1^{x_T} s^- dx + m c_1 \rho_1 T_0 \int_1^{x_T} (1 - s^- - \langle s_0 \rangle) dx + \\ + m c_0 \rho_0 \langle s_0 \rangle T_0 x_T + \langle s_0 \rangle m c_0 \rho_0 T_p (x_{f0} - x_T) + (1 - m) c_c \rho_c T_p (x_{f0} - x_T) + \\ + m c \rho T_p \int_{x_T}^{x_f} s^+ dx + m c_1 \rho_1 T_p \int_{x_T}^{x_f} (1 - s^+ - \langle s_0 \rangle) dx + Q_p, \quad (5)$$

$$Q_p = T_p m (x_{f0} - x_f) (c \rho s^0 + c_1 \rho_1 (1 - s^0 - s_0^0) + c_0 \rho_0 s_0^0).$$

Из интегрального закона сохранения энергии с учетом формул (4), (5) получаем уравнение для определения глубины  $x_T$  охлаждения (в случае  $T_0 < T_p$ ) или нагрева (в случае  $T_0 > T_p$ ) пласта вблизи скважины. Входящие в полученное уравнение интегралы вычисляются стандартным образом: с учетом решения (1), выполненного на некотором интервале

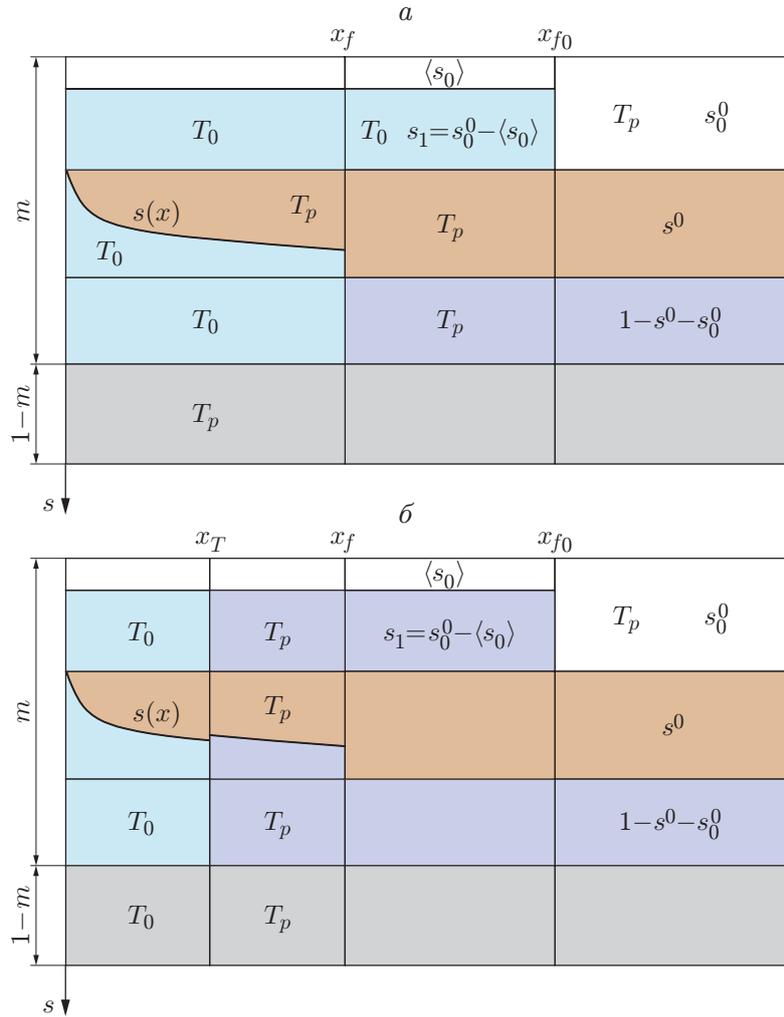


Рис. 1. Распределения насыщенных и теплосодержания в пласте:  
 а — состояние I, б — состояние II

зоны проникновения воды  $(x_0, x_1)$  в пласт, путем интегрирования по частям. В результате имеем

$$\int_{x_0}^{x_1} s \, dx = \int_{s(x_0)}^{s(x_1)} s \frac{dx}{ds} \, ds = \tau \int_{s^0}^{s_1} s F''(s) \, ds = \tau [s^1 F'(s^1) - s^0 F'(s^0) - F(s^1) + F(s^0)].$$

Согласно свойству потоковой функции Леверетта имеем  $v^\pm = V(t)F_\pm(s^\pm, \langle s_0 \rangle; \alpha^\pm)$ ,  $v_1^\pm = V(t)(1 - F_\pm(s^\pm, \langle s_0 \rangle; \alpha^\pm))$ . Очевидно, что на границе теплового фронта из условия непрерывности скоростей фильтрации нефти и воды следует условие  $F_+(s_T^+, \alpha^+) = F_-(s_T^-, \alpha^-)$ , или в развернутом виде

$$\frac{\alpha^+ f(s_T^+)}{\alpha^+ f(s_T^+) + f_1(s_T^+) + \alpha_0 f_0(\langle s_0 \rangle)} = \frac{\alpha^- f(s_T^-)}{\alpha^- f(s_T^-) + f_1(s_T^-) + \alpha_0 f_0(\langle s_0 \rangle)}. \quad (6)$$

Кроме того, для однозначного определения положения теплового фронта необходимо выполнение еще одного условия, которое можно записать в виде

$$F'_+(s_T^+, \langle s_0 \rangle; \alpha^+) = F'_-(s_T^-, \langle s_0 \rangle; \alpha^-). \quad (7)$$

Насыщенность нефтью  $s_f$  на фронте вытеснения нефти водой  $x = x_f = 1 + \tau F'_+(s_f)$  определяется из кинематического условия, которое приводит к трансцендентному уравнению

$$s_f = s_0 - [F_+(s_0, \alpha^+) - F_+(s_f, \alpha^+)]/F'_+(s_f, \alpha^+). \quad (8)$$

Таким образом, алгоритм построения решения сводится к следующему. Задаются температуры пласта и закачиваемой воды, начальная насыщенность пласта нефтью, значения плотностей и удельных теплоемкостей всех фаз. Исходные данные о вязкости флюидов берутся из работ [3, 8]. Для различных значений  $T_0, T_p$  вычисляются величины  $\alpha^\pm$ . Из уравнений (6), (7) находятся насыщенности нефтью пласта по обе стороны от теплового фронта. Параметр  $x_T$  определяется из уравнения баланса тепла. Таким образом найдены все параметры течения и распределение фаз в соответствующих областях.

**Примеры частных случаев проникновения.** Рассмотрим некоторые случаи проникновения фильтрата бурового раствора в пласт.

Пример 1. Проникновение фильтрата в водоносный пласт ( $s = s_0 = 0$ ) с двойной пористостью: транзитной (эффективной)  $m_1$  и тупиковой  $m_2$ . Общая пористость пласта равна  $m = m_1 + m_2$ . В процессе фильтрации содержащаяся в тупиковых порах вода остается неподвижной. Будем полагать, что обмен солями между растворами в порах обоих видов происходит аналогично обмену теплом (2) в соответствии с уравнением кинетики вида

$$\alpha_C \frac{\partial N}{\partial t} = C - N, \quad (9)$$

где  $\alpha_C$  — малый параметр;  $N$  — концентрация неподвижного раствора.

Изменение концентраций описывается уравнением переноса

$$\frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial \tau} + \lambda_m \frac{\partial N}{\partial \tau} = 0, \quad (10)$$

где  $\lambda_m = m_2/m_1$ . Фронт проникновения фильтрата бурового раствора с концентрацией солей  $C_0$  в пласт определяется одной из характеристик системы уравнений (8), (9):

$$x = x_f(\tau) = 1 + \tau, \quad \tau = \frac{2}{m_1 r_w} \int_0^t V(t) dt.$$

При высокой скорости массообмена  $\alpha_C \rightarrow 0$ ,  $N = C$  и уравнение (10) принимает вид

$$\frac{\partial C}{\partial x} + (1 + \lambda_m) \frac{\partial C}{\partial \tau} = 0.$$

Характеристикой полученного уравнения является расширяющаяся с течением времени “окаймляющая зона”  $x_{bz} = (r_{bz}/r_w)^2$  с более низким по сравнению с остальной частью зоны проникновения удельным электрическим сопротивлением (УЭС)

$$x_{bz} = 1 + \tau/(1 + \lambda_m)$$

( $r_{bz}$  — радиус “окаймляющей зоны”).

Таким образом, распределение концентрации принимает вид ступенчатой функции

$$C(x, \tau) = \begin{cases} C_0, & 1 < x < x_{bz}, \\ N, & x_{bz} < x. \end{cases}$$

Система уравнений, описывающая перенос тепла с учетом теплообмена между подвижным раствором и неподвижными составляющими гетерогенной структуры — скелетом породы и связанной с ней пластовой водой, включает уравнения кинетики (2) и уравнения переноса

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_0}{\partial x} + c_1 \rho_1 \frac{\partial T_0}{\partial \tau} + \left[ \frac{(1-m)c_c \rho_c}{m_1} + \lambda_m c_1 \rho_1 \right] \frac{\partial T_p}{\partial \tau} = 0. \quad (11)$$

При бесконечно высокой скорости теплообмена  $\alpha_T \rightarrow 0$  характеристика расширенного уравнения, получаемого подстановкой в уравнение (11)  $T_0$  вместо  $T_p$ , определяет координату фронта распространения тепла в пласте:

$$x_T = 1 + \tau/[1 + \lambda_m + (1 - m)\lambda_{cc}\lambda_{\rho c}/m_1] \quad (\lambda_{cc} = c_c/c_1, \quad \lambda_{\rho c} = \rho_c/\rho_1).$$

Для вычисления УЭС используем обобщенную формулу Арчи [9]

$$R_{s1} = s_1^{-n} a(0,0123 + 3647,5C^{-1})/(1,8T + 39),$$

где  $R_{s1}$  — УЭС породы с насыщенностью пор водой  $s_1$  и концентрацией  $C$ , млн<sup>-1</sup>;  $T$  — температура, °С;  $n \approx 2$ ,  $a$  — некоторые константы для данного вида породы.

Пример 2. Проникновение фильтрата в газоносный пласт ( $s^0 = 0$ ) с тушиковой и транзитной пористостью. Данный случай сводится к предыдущему. Для этого в уравнении (11) параметр  $m_1$  следует заменить на  $m(s_0^0 - \langle s_0 \rangle)$ , а  $m_2$  — на  $m(1 - s_0^0)$  ( $s_0^0, \langle s_0 \rangle$  — начальная и остаточная насыщенности порового пространства пласта газом;  $s_1^0 = 1 - s_0^0$  — насыщенность связанной пластовой водой). При поршневом вытеснении в зоне проникновения  $v_1 = V(t)$ ,  $v_0 = 0$ . Уравнение переноса тепла принимает вид

$$v_1 c_1 \rho_1 \frac{\partial T_0}{\partial x} + m(s_0^0 - \langle s_0 \rangle) c_1 \rho_1 \frac{\partial T_0}{\partial t} + [(1 - m)c_c \rho_c + m(1 - s_0^0)c_1 \rho_1 + m\langle s_0 \rangle c_0 \rho_0] \frac{\partial T_p}{\partial t} = 0.$$

Координата фронта проникновения определяется по формуле

$$x_{f0} = 1 + \frac{2}{m(s_0^0 - \langle s_0 \rangle)r_w} \int_0^t v_1(t) dt = 1 + \tau,$$

координата “окаймляющей” зоны — по формуле

$$x_{bz} = 1 + \tau \frac{1 - s_0^0}{2 - (\langle s_0 \rangle + s_0^0)},$$

координата теплового фронта — по формуле

$$x_T = 1 + \frac{s_0^0 - \langle s_0 \rangle}{(1 - m)\lambda_{cc}\lambda_{\rho c}/m + (1 - \langle s_0 \rangle) + \langle s_0 \rangle\lambda_{c0}\lambda_{\rho 0}} \quad \left( \lambda_{c0} = \frac{c_0}{c_1}, \quad \lambda_{\rho 0} = \frac{\rho_0}{\rho_1} \right).$$

В соответствии с обобщенным законом Арчи сопротивление зоны проникновения, охлажденной фильтратом  $R_{nT}$ , связано с параметром  $R_n$ , определенным при постоянной температуре пласта, соотношением

$$R_{nT} = \frac{1,8T_p + 39}{1,8T_0 + 39} R_n.$$

При  $T_p = 80$  °С,  $T_0 = 20$  °С получаем  $R_{nT} = 2,4R_n$ . Для примеров 1, 2 распределение УЭС вблизи скважины приведено на рис. 2.

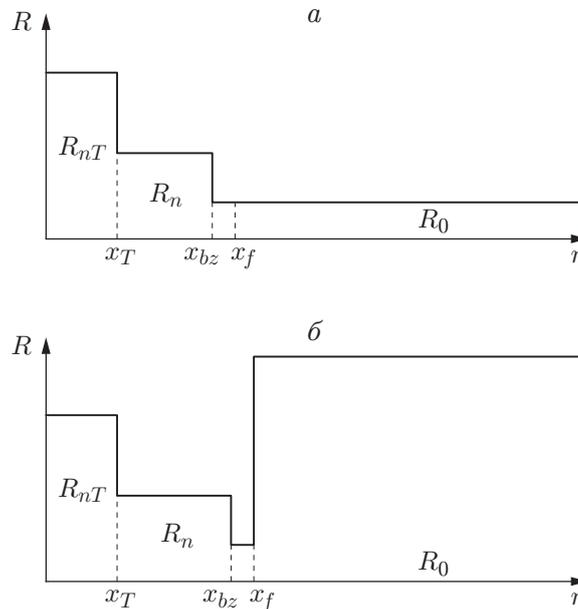


Рис. 2. Распределения УЭС в зоне проникновения относительно пресного фильтра бурового раствора в водоносный (а) и газоносный (б) пласты

Пример 3. Перенос тепла при проникновении фильтра в нефтяной пласт ( $s_0 = 0$ ). Введем безразмерный параметр задачи  $\lambda_T = T_0/T_p$ . Тогда с учетом разрыва насыщенности на тепловом фронте  $x = x_T$  при проникновении фильтра в нефтяной пласт уравнение баланса тепловой энергии принимает вид

$$\begin{aligned} (1-m)c_c\rho_c(x_f-1) + mc\rho \int_1^{x_a} s^+ dx + mc_1\rho_1\lambda_T \left(x_f-1 - \int_1^{x_a} s^+ dx\right) = \\ = (1-m)c_c\rho_c\lambda_T(x_T-1) + mc\rho\lambda_T \int_1^{x_T} s^- dx + mc_1\rho_1\lambda_T \left(x_T-1 - \int_1^{x_T} s^- dx\right) + \\ + (1-m)(x_f-x_T)c_c\rho_c + mc\rho \int_{x_T}^{x_f} s^+ dx + mc_1\rho_1 \left(x_f-x_T - \int_{x_T}^{x_f} s^+ dx\right). \end{aligned}$$

Вычислив интегралы и проведя некоторые преобразования для определения теплового фронта, получаем

$$\begin{aligned} x_T(\lambda_m\lambda_{cc}\lambda_{\rho c} + 1) = x_f + \lambda_m\lambda_{cc}\lambda_{\rho c} + \\ + (1-\lambda_c\lambda_\rho)\tau\{\lambda_T[s_T^-F'(s_T^-) - F(s_T^-)] - [s_T^+F'(s_T^+) - F(s_T^+)]\}/(1-\lambda_T) - \tau[s_fF'(s_f) - F(s_f)], \end{aligned}$$

где  $\lambda_m = (1-m)/m$ ;  $\lambda_c = c/c_1$ ;  $\lambda_\rho = \rho/\rho_1$ . С учетом условий непрерывности потока воды (условие (5) при  $s_0 = 0$ ) и однозначности положения теплового фронта  $x = x_T^+ = 1 + \tau F'_+(s_T^+) = x_T^- = 1 + \tau F'_-(s_T^-)$  имеем

$$F_-(s_T^-) = F_+(s_T^+), \quad F'_-(s_T^-) = F'_+(s_T^+). \quad (12)$$

Учитывая эти условия для координаты теплового фронта, получаем выражение

$$x_T = 1 + \tau \frac{(1-\lambda_c\lambda_\rho)[(\lambda_T s_T^- - s_T^+)F'_+(s_T^+)/(1-\lambda_T) + F_+(s_T^+)] + (1-s_f)F'_+(s_f) + F_+(s_f)}{1 + \lambda_m\lambda_{cc}\lambda_{\rho c}}.$$

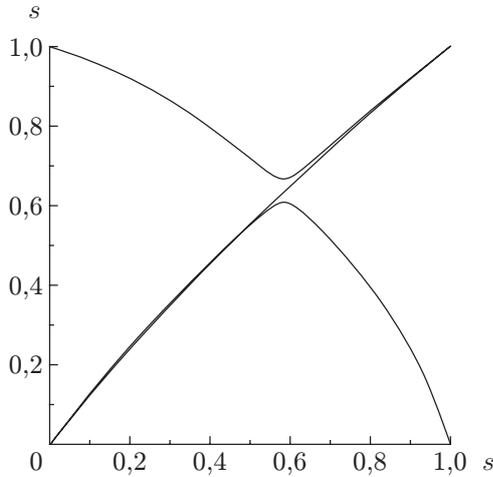


Рис. 3

Рис. 3. Контурные линии для системы трансцендентных уравнений (12)

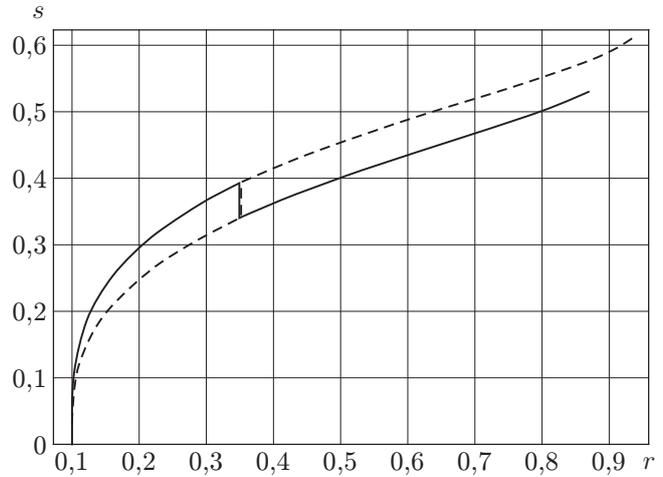


Рис. 4

Рис. 4. Тепловой фронт и распределение насыщенности нефтью при охлаждении зоны проникновения (сплошная линия) и нагреве (штриховая линия)

Основные характеристики вытеснения нефти при двух значениях  $\alpha^{+,-}$

$\alpha^{+,-}$	$s_f$	$\langle F \rangle$	$\langle s \rangle$	$r_f, \text{ м}$
0,33	0,529	0,0999	0,423	0,869
0,16	0,608	0,1200	0,489	0,930

Численное решение системы трансцендентных уравнений (12) определяется пересечением контурных линий на рис. 3. Наличие ветвей у одной из этих линий объясняется неоднозначностью производной от потоковой функции Леверетта. При исходных данных  $s^0 = 0,7, r_n = 0,5 \text{ м}, r_w = 0,1 \text{ м}, \lambda_m = 3, \lambda_c = 0,21, \lambda_p = 0,85, \lambda_{cc} = 0,19, \lambda_{pc} = 2,4, \lambda_T = 0,25$  получаем координату теплового фронта  $x_T = 12,6556$  ( $r_T = 0,355 \text{ м}$ ) и основные характеристики вытеснения для двух значений  $\alpha^{+,-}$ , приведенные в таблице.

Насыщенность нефтью на тепловом фронте равна  $s_T^+ = 0,342, s_T^- = 0,394$ , что удовлетворяет условиям непрерывности потоков (12) с точностью до 0,002. На рис. 4 приведены распределения насыщенности пласта нефтью в зоне проникновения при охлаждении и нагреве. Заметим, что при расчете нагрева пласта принимались одни и те же отношения вязкости флюидов разогретого и охлажденного участков зоны проникновения. В обоих случаях при  $x > x_f$  насыщенность нефтью скачкообразно увеличивается до начального значения  $s = s^0 = 0,7$ .

Распределение УЭС вблизи скважины имеет вид

$$R = \begin{cases} R_{nT} = R_n(1,8T_p + 39)/(1,8T_0 + 39), & 0 < x < x_T, \\ R_n = R_n^0/(1 - \langle s \rangle)^2, & x_T < x \leq x_{bz}, \\ R_{oz} = R_0^0/(1 - \langle s \rangle)^2, & x_{bz} < x < x_f, \\ R_0 = R_0^0/(1 - s_0)^2, & x_f < x, \end{cases}$$

где  $R_0^0$  — УЭС невозмущенной части пласта;  $R_n^0$  — УЭС зоны, полностью насыщенной фильтратом. Таким образом, в распределении УЭС с учетом изменения температуры

фильтрата в отличие от распределения, получаемого в изотермическом случае проникновения, появилась еще одна ступенька [4].

**Заключение.** Проведенное исследование процесса проникновения водного фильтрата глинистого бурового раствора в пласт, насыщенный нефтью, газом и природной водой, показало, что существенным является учет изменения температуры пласта. Уравнение переноса тепла следует дополнить уравнением кинетики обмена тепловой энергией между флюидами и скелетом породы внутри пор. Охлаждение зоны проникновения приводит к повышению УЭС вблизи скважины. Это необходимо учитывать при интерпретации данных скважинного зондирования пластов электрическими методами. Рассмотрены частные случаи проникновения.

Полученные результаты применимы и для оценки теплового воздействия на пласт путем закачки горячей воды с целью увеличения нефтеотдачи пласта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Желтов Ю. П.** Механика нефтегазонасного пласта. М.: Недра, 1975.
2. **Мирзаджанзаде А. Х.** Физика нефтяного и газового пласта / А. Х. Мирзаджанзаде, И. М. Аметов, А. Г. Ковалев. М.: Недра, 1992.
3. **Нестерова Г. В., Яценко И. Г., Назаров Л. А.** Моделирование влияния вязкости пластовой нефти на распределение УЭС в окрестности скважины и скважинные измерения // Материалы 9-й Междунар. науч. конф. "Гео-Сибирь-2013". Новосибирск: Сиб. гос. геодес. акад., 2013. Т. 2. С. 137–140.
4. **Данаев Н. Т.** Массоперенос в прискважинной зоне и электромагнитный каротаж пластов / Н. Т. Данаев, Н. К. Корсакова, В. И. Пеньковский. Алма-Ата: Каз. нац. ун-т, 2005.
5. **Корсакова Н. К., Пеньковский В. И.** Распределение фаз и внутривискозный обмен солями при проникновении бурового раствора в нефтегазосодержащий пласт // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2009. Т. 44, № 2. С. 116–124.
6. **Жумагулов Б. Т.** Гидродинамика нефтедобычи / Б. Т. Жумагулов, В. Н. Монахов. Алма-Ата: Каз. гос. науч.-исслед. ин-т науч.-техн. информ., 2001.
7. **Пеньковский В. И.** К вопросу о математическом моделировании процесса рассоления грунтов // ПМТФ. 1975. № 5. С. 186–191.
8. **Полищук Ю. М.** Физико-химические свойства нефтей: статистический анализ пространственных и временных изменений / Ю. М. Полищук, И. Г. Яценко. Новосибирск: Изд-во "Гео", 2004.
9. **Well logging and interpretation techniques.** Houston: Dresser Atlas Inc. Dresser Industries, 1982. Chap. 3.

*Поступила в редакцию 9/VIII 2013 г.,  
в окончательном варианте — 21/X 2013 г.*