

ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 622.276.031:53

С. А. Ахмедов, З. Х. Ахмедова, Х. Г. Ахмедова

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ЗАДАЧАХ ВЫТЕСНЕНИЯ ПАРАФИНИСТОЙ НЕФТИ ВОДОЙ В МНОГОСЛОЙНОМ ПЛАСТЕ

При термозаводнении пластов температурные условия в коллекторах формируются в основном в процессе теплообмена между нагнетаемой жидкостью и коллектором с прилегающими горными породами. Теплопередача в пластах складывается из теплопроводности через твердый пористый скелет, теплопроводности и конвекции через поры и других факторов. Особенно остро проявляется необходимость анализа температурных полей и нефтеотдачи пластов, насыщенных парафином. Следует тщательно отработать методические вопросы, возникающие при расчетах полей температуры, давления и нефтенасыщенности, особенно в многослойных пластах. При этом необходимо учитывать теплообмен между пластом и окружающими пласт породами. Предлагается методика расчета температурных полей и нефтенасыщенности при вытеснении нефти водой в многослойных пластах с учетом передачи тепла в кровлю и подошву.

Ключевые слова: пласт, математическое моделирование, термозаводнение, показатели, теплообмен.

Введение

Задача расчета температурного поля при нагнетании в пласт теплоносителя неотделима от задачи определения поля нефтенасыщенности. При использовании конечно-разностных алгоритмов счета требование высокой точности определения поля насыщенности приводит к необходимости тщательного рассмотрения методических вопросов, возникающих при расчетах полей температуры в многослойных пластах.

Целью исследования являлся расчет температурных полей для многослойных пластов, содержащих парафинистые нефти, при неизотермическом вытеснении нефти водой.

Постановка задачи

В постановке задачи принят ряд ограничений, широко применяемых в теоретических исследованиях [1–4].

Пласт предполагается слоистым, число пропластков и их расположение произвольны, пропластки имеют различную проницаемость. Пропластки считаются гидродинамически изолированными, но термически контактирующими. В каждом из пропластков вытеснение происходит автономно. Распределение значений давления, насыщенности и температуры в пропластках различно.

Температура нагнетаемой воды отлична от температуры пластовой воды, и ее значение может меняться. Теплопередача в пропластках осуществляется за счет конвекции тепла с фильтрующейся жидкостью и теплообмена с окружающими пропластами.

Метод исследования

Для исследования принимается схема Ловерье – схема учета обмена теплом с кровлей и подошвой, т. е. глинистые перемычки, пропластки нефтенасыщенные и окружающая порода

считаются теплопроводными лишь в направлении перпендикулярном напластованию. От температуры зависят физические и фильтрационные свойства пластовых жидкостей и коллекторов при вытеснении в пористой среде одного флюида другим.

Для реального пласта, геологическое строение которого известно с небольшой степенью расчлененности, с толщиной пропластков более одного метра, значения их температуры следует считать различными. Потоки тепла между пропластками будут зависеть от толщины пропластков и глинистых перемычек между ними [1, 2].

Условимся присоединять к пласту по 5 слоев горной породы (глины) с кровельной и подошвенной части толщиной 3–4 м. Всего достаточно присоединить около 20 м и сверху и снизу, чтобы с достаточной удовлетворительностью учесть потери (или приток при холодном заводнении) тепла в кровлю и подошву. Нумерацию присоединенных слоев и пропластков будем вести единую: $k = 1, 2, \dots, 5$ для слоев, присоединенных у подошвы; $k = 6, 7, \dots, n_z + 5$ – для пропластков; $k = n_z + 6, \dots, n_z + 10$ – для слоев, присоединенных к кровле; n_z – число нефтенасыщенных пропластков.

Поток тепла из k -го слоя в $(k + 1)$ -й можно теперь выразить в виде

$$q_k = -\alpha_k(T_{k+1} - T_k), \quad (1)$$

где α_k – коэффициент теплопередачи для данного слоя, не зависящий от координат x, y ; T_{k+1} и T_k – температура $k + 1$ и k -го слоя:

$$\alpha_k = \left(\frac{H_k + H_{k+1}}{2\lambda_{\text{п}}} + \frac{h_k}{\lambda_{\text{г}}} \right)^{-1}.$$

Здесь H_k – мощность пропластка или присоединенного слоя; h_k – мощность глинистой перемычки; $\lambda_{\text{п}}$ – коэффициент теплопроводности для пропластков; $\lambda_{\text{г}}$ – коэффициент теплопроводности глинистой перемычки. Для присоединенных слоев и подошвы $h_k = 0$, $k = 1, 2, \dots, 5$ и $k = n_z + 6, \dots, k = n_z + 10$.

Для численных расчетов процесса вытеснения применяется метод конечных разностей на комбинированной сетке: по области берется квадратная сетка; на нее накладывается кольцевая сетка с центром в нагнетательной скважине, простирающаяся на полтора шага сетки; накладываются секториальные и трапециевидные ячейки вокруг добывающих скважин; вводятся средние по ячейкам значения насыщенности, температуры и давления в узлах сетки; среднегармоническое значение проводимости по звеньям и между соседними ячейками (аналогично и в ячейках накладываемых кольцевых и секториальных сеток) [1].

Вычисление температурного поля на каждом временном слое производится в два этапа. Первый этап соответствует конвективному переносу тепла по пропласткам. На этом этапе меняется лишь температура пропластков; слои, присоединенные к кровле и подошве, сохраняют свою температуру. Второй этап соответствует кондуктивной передаче тепла через глинистые перемычки и в присоединенных слоях. Здесь принимается, что кондуктивный перенос происходит лишь в поперечном (перпендикулярном напластованию) направлении. Для каждой ячейки по площади (i, j) решается одномерная задача кондуктивной передачи тепла в поперечном направлении.

Уравнение переноса тепла в каждом из пропластков записываем в следующем дивергентном виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(cT)_k + \text{div} \left[(c_{\text{в}}\vec{V}_{\text{в}} + c_{\text{н}}\vec{V}_{\text{н}})HT \right]_k = q_{k-1} - q_k,$$

где q_k – тепловой поток, уходящий из пропластка с номером k ; c_k – теплоемкость пропластка с присоединением половины мощности h_k слоя глинистой перемычки; $\vec{V}_{\text{в}}$, $\vec{V}_{\text{н}}$ – скорость фильтрации воды и нефти.

Выпишем формулы для вычисления значений температуры на новом временном слое и ограничимся для простоты случаем линейного пласта (галереи) [1, 4].

Начальный профиль температур берется с учетом геотермального градиента – примерно 3° на 100 м мощности по вертикали. На первом этапе из условия баланса тепла за время dt для пропластка мощностью H_k имеем для явной схемы

$$\begin{aligned} & (\tilde{c}_{ik}\tilde{T}_{ik} - c_{ik}T_{ik})\Delta x \cdot H_k = (c_v v_v + c_n v_n)_{i-1,k} H_k T_{i-1,k} \Delta t - \\ & - (c_v v_v + c_n v_n)_{i,k} H_k T_{ik} \Delta t, \quad k = 6, 7, \dots, n_z + 5, \end{aligned}$$

где c_v и c_n – объемная теплоемкость воды и нефти; c_{ik} – удельная теплоемкость ячейки (i, k); v_v, v_n – скорость фильтрации воды и нефти; Δt – время.

Знак \sim означает, что мы получаем промежуточные значения температуры; значения \tilde{c}_{ik} будут известны после того, как новые значения насыщенности будут найдены из решения задачи вытеснения. Произведя упрощения, получаем:

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{ik} = \frac{1}{\tilde{c}_{ik}} \left\{ c_{ik} T_{ik} + \frac{v_k \Delta t}{\Delta x} \left[(\Delta c F_{i-1,k} + c_n) T_{i-1,k} - (\Delta c F_{ik} + c_n) T_{ik} \right] \right\}, \\ k = 6, 7, \dots, n_z + 5; \end{aligned}$$

где $\Delta c = c_v - c_n$; $F_{ik} = (c_{ik} - c_n) / \Delta c$; $v_k = (v_v + v_n)_k$; $\tilde{T}_{ik} = T_{ik}$ для $k = 1, 2, \dots, 5$; $n_z + 6, \dots, n_z + 10$.

На втором этапе вычисляем кондуктивный теплообмен, приняв гипотезу Ловерье. Из условия баланса тепла за время dt теперь имеем

$$(\tilde{c}_{ik}\hat{T}_{ik} - \tilde{c}_{ik}\tilde{T}_{ik})\Delta x H_k = (\hat{q}_{i,k-1} - \hat{q}_{ik})\Delta x \Delta t. \quad (2)$$

Подставив вместо \hat{q}_{ik} выражения (1), получаем трехдиагональную систему уравнений неявного вида:

$$-\frac{\Delta t \alpha_{k-1}}{H_k \tilde{c}_{ik}} \hat{T}_{i,k-1} + \left[1 + \frac{\Delta t (\alpha_{k-1} + \alpha_k)}{\tilde{c}_{ik} H_k} \right] \hat{T}_{ik} - \frac{\Delta t \alpha_k}{\tilde{c}_{ik} H_k} \hat{T}_{i,k+1} = \tilde{T}_{ik}. \quad (3)$$

Выбор неявной формы для кондуктивных потоков тепла обусловлен существенными причинами – явная схема для тонких пропластков может приводить к неустойчивости. Уравнение (3) справедливо для слоев $k = 2, 3, \dots, n_z + 9$. Для крайних слоев пользуемся условиями $\hat{q}_{i0} = 0$ и $\hat{q}_{i,n_z+10} = 0$, или, что то же самое, $\alpha_0 = \alpha_{n_z+10} = 0$.

Из (2) при этих условиях получаем

$$\hat{T}_{i1} = \frac{(\alpha_1 \Delta t / \tilde{c}_{i1} H_1) \hat{T}_{i2} + \tilde{T}_{i1}}{1 + \alpha_1 \Delta t / \tilde{c}_{i1} H_1} \quad (4)$$

и для $k = n_z + 10$

$$\left(1 + \frac{\Delta t \alpha_{k-1}}{\tilde{c}_{ik} H_k} \right) \hat{T}_{ik} - \frac{\Delta t \alpha_{k-1}}{\tilde{c}_{ik} H_k} \hat{T}_{i,k-1} = \tilde{T}_{ik}. \quad (5)$$

Уравнения (3)–(5) решаются отдельно для каждого i методом прогонки по индексу k . Придадим этим уравнениям более простой вид.

$$A_k = \frac{\alpha_{k-1} \Delta t}{\tilde{c}_{ik} H_k}, \quad B_k = \frac{\alpha_k \Delta t}{\tilde{c}_{ik} H_k}$$

при $k = 1$ $A_1 = 0$ и при $k = n_z + 10$ $B_{n_z+10} = 0$ исходя из постановки задачи.

Опустив индекс i у температуры, перепишем систему в виде

$$\begin{cases} -A_k \hat{T}_{k-1} + (1 + A_k + B_k) \hat{T}_k - B_k \hat{T}_{k+1} = \tilde{T}_k, \\ k = 1, 2, \dots, n_z + 10; B_{n_z+10} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Согласно методу прогонки, представим искомые значения температуры в виде

$$\hat{T}_{k-1} = P_{k-1} \hat{T}_k + Q_{k-1}, \quad (7)$$

где P и Q – прогоночные коэффициенты.

Из (4) тогда следует, что

$$P_1 = \frac{B_1}{1 + B_1}, \quad Q_1 = \frac{\tilde{T}_1}{1 + B_1},$$

а подстановка в (7) приводит к рекуррентным соотношениям:

$$P_k = \frac{B_k}{1 + B_k + (1 - P_{k-1})A_k}, \quad Q_k = \frac{\tilde{T}_k + A_k Q_{k-1}}{1 + B_k + (1 - P_{k-1})A_k},$$

по которым массивы P_k и Q_k определяются до $k = n_z + 10$. Для нахождения температуры верхнего слоя теперь можно использовать совместно уравнения (6) и (7), откуда получаем

$$\hat{T}_{n_z+10} = \frac{T_{n_z+10} + A_{n_z+10} Q_{n_z+9}}{1 + (1 - P_{n_z+9})A_{n_z+10}}.$$

Сделаем еще одно замечание относительно определения теплоемкости пропластков. Поскольку глинистые переемычки не только создают тепловое сопротивление, но и согреваются и остужаются, их объемная теплоемкость должна присоединяться сверху и снизу по половине глинистой переемычки. Для k -го пропластка толщиной H_k объемная теплоемкость выразится формулой

$$H_k c_k = [c_{*в} s_k + c_{*н} (1 - s_k)] H_k + 0,5(h_k + h_{k-1})c,$$

где $c_{*в}, c_{*н}, c$ – удельная объемная теплоемкость водонасыщенного пласта, нефтенасыщенного пласта и горной породы соответственно; s_k – водонасыщенность; h_k – толщина глинистой переемычки.

Отметим, наконец, важное преимущество учета температуры каждого из пропластков. Можно произвольно менять температуру закачиваемой воды на входе, переходить от нагнетания горячей воды к нагнетанию холодной. Все соотношения сохраняются, программа становится более универсальной.

Выпишем соотношения, позволяющие увязать значения насыщенности и температуры дополнительных радиально-кольцевых сеток со значениями величин для ячеек квадратной сетки. Пусть $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$ – насыщенность, $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ – объемная теплоемкость шести колец вокруг нагнетательной скважины, расположенной в узле. Тогда

$$\begin{aligned} s_{11} &= 0,196s_1 + 0,589s_2 + 0,215s_3; \\ c_{11} &= 0,196c_1 + 0,589c_2 + 0,215c_3. \end{aligned}$$

Для соседних ячеек

$$\begin{aligned} s_{12} = s_{21} &= 0,190s_3 + 0,266s_4 + 0,266s_5 + 0,278s_6; \\ c_{12} = c_{21} &= 0,190c_3 + 0,266c_4 + 0,266c_5 + 0,278c_6. \end{aligned}$$

Значения насыщенности s_{12} и s_{21} используются уже при определении насыщенности в разностных схемах, написанных для квадратной сетки. Сами значения s_{12} , s_{21} и s_{11} определяются по разностным схемам, написанным для кольцевой зоны пласта.

Аналогичные формулы пишутся и для значений температуры ячеек квадратной сетки исходя из равенства общего количества тепла:

$$T_{11} = \frac{0,196 c_1 T_1 + 0,589 c_2 T_2 + 0,215 c_3 T_3}{0,196 c_1 + 0,589 c_2 + 0,215 c_3},$$

$$T_{12} = T_{21} = \frac{0,190 c_3 T_3 + 0,266 c_4 T_4 + 0,266 c_5 T_5 + 0,278 c_6 T_6}{0,190 c_3 + 0,266 c_4 + 0,266 c_5 + 0,278 c_6}.$$

Значения температуры T_{12} и T_{21} влияют на расчет температуры ячеек сетки по площади. Разумеется, при аппроксимации на разностной схеме потоков массы и потоков тепла вдоль координат вклад от каждой из кольцевых зон неодинаков. В связи с этим возникает желание вводить для ячеек, соседних с нагнетательной скважиной, по два значения насыщенности и температуры для каждой из координатных осей. Такой расчет был бы точнее. Но в расчетах усреднены значения насыщенности и температуры по всей ячейке.

Радиусы секторов вокруг добывающих скважин приняты равными $r_{сe} = 0,564\Delta x$. Сумма площадей всех секторов равна площади одной квадратной ячейки. Трапецидальные ячейки выбраны так, чтобы их центры лежали на окружности радиусом $r_{тp} = \Delta x$.

По значениям давлений в узлах квадратной сетки интерполяцией определялись давления в центрах трапецидальных ячеек. Интерполяция учитывала логарифмический характер профиля давления вблизи скважины. В соответствии с этим давление в окрестности добывающей скважины представлялось в виде

$$P = P_3 + (a + bx + cy) \ln \frac{r}{r_c},$$

где P_3 – давление в добывающей скважине; r_c – радиус скважины.

По значениям давления в трех соседних точках:

$$\begin{cases} P_{nx-1,ny} = P_3 + (a - b\Delta x) \ln \frac{\Delta x}{r_c}; \\ P_{nx,ny-1} = P_3 + (a - c\Delta y) \ln \frac{\Delta y}{r_c}; \\ P_{nx,ny-1} = P_3 + (a - b\Delta x - c\Delta y) \ln \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{r_c}, \end{cases}$$

находим неизвестные коэффициенты a , b и c . Для давления в центрах трапецидальных ячеек после замены a , b , c их выражениями, получаем

$$P_i = P_3 + (1 - \sin \alpha_i)(P_{nx-1,ny} - P_3) + (1 - \cos \alpha_i)(P_{nx,ny-1} - P_3) + (\cos \alpha_i + \sin \alpha_i - 1) \frac{\ln(\Delta x / r_c)}{\ln(\Delta x \sqrt{2} / r_c)} (P_{nx-1,ny-1} - P_3),$$

где α_i – угол, образованный с отрицательным направлением оси Ox вектором, проведенным из добывающей скважины в центр трапецидальной ячейки. По разности давлений $P_i - P_3$ вычисляется расход по сектору общего фильтрационного потока двухфазной смеси.

Средние значения насыщенности в трапецидальных ячейках выражаются линейной интерполяцией насыщенности трех ячеек, соседних со скважиной. По аналогии с выводом предыдущих формул имеем

$$s_i = (1 - \sin \alpha_i) s_{nx-1,ny} + (\cos \alpha_i + \sin \alpha_i - 1) s_{nx-1,ny-1} + (1 - \cos \alpha_i) s_{nx,ny-1}.$$

Аналогичные формулы получаем и для значений температуры трапецидальных ячеек:

$$T_i = \frac{(1 - \sin \alpha_i) c_{nx-1,ny} T_{nx-1,ny} + (\cos \alpha_i + \sin \alpha_i - 1) c_{nx-1,ny-1} T_{nx-1,ny-1} + (1 - \cos \alpha_i) c_{nx,ny-1} T_{nx,ny-1}}{(1 - \sin \alpha_i) c_{nx-1,ny} + (\cos \alpha_i + \sin \alpha_i - 1) c_{nx-1,ny-1} + (1 - \cos \alpha_i) c_{nx,ny-1}}.$$

Здесь c_{ij} – объемная теплоемкость по всей толщине пласта с учетом прогреваемости горных пород. Значения температуры трапециевидных ячеек используются при нахождении значений температуры каждого из секторов добывающей скважины.

Вблизи нагнетательной и добывающей скважин фильтрация считается осесимметричной, одномерной. Движение происходит автономно по каждому сектору. Определим фильтрационное сопротивление сектора I_{ce} центра трапецидальной ячейки до контура скважины по вязкости водонефтяной смеси μ_{bn} в ячейке и соответствующем секторе по закону сложения сопротивлений при последовательном соединении:

$$I_{ce} = \frac{10}{\pi k} \left(\mu_{bn}^{ce} \ln \frac{0,564 \Delta x}{r_c} + \mu_{bn}^{tp} \ln 1,773 \right),$$

где μ_{bn} – вязкость водонефтяной смеси.

Наличие множителя $10/\pi$ объясняется тем, что каждый из секторов представляет собой 20-ю часть полного угла. Расход по сектору выражается формулой

$$q_{ce} = \frac{P_{tp} - P_3}{I_{ce}}, \quad q_3 = \sum q_{ce},$$

причем величины P_{tp} , I_{ce} , q_{ce} различны для различных пропластков в многослойном пласте.

Гидропроводность примыкающих к добывающей скважине прямоугольных звеньев вдоль координатных осей определялась по формулам из [1]:

$$kMx_{nx-1,ny} = \frac{2}{I_1} + \frac{2}{I_2} + \frac{1}{I_3};$$

$$kMy_{nx,ny-1} = \frac{2}{I_5} + \frac{2}{I_4} + \frac{1}{I_3},$$

где I_1, I_2, \dots, I_5 – сопротивления секторных зон для симметричного случая.

Возле нагнетательной скважины общее фильтрационное сопротивление определяется суммированием сопротивлений четырех кольцевых зон:

$$I_H = \frac{1}{2\pi k} \left(\mu_{bn}(s_1, T_1) \ln \frac{0,25 \Delta x}{r_c} + \sum_2^4 \mu_{bn}(s_i, T_i) \ln \frac{i}{i-1} \right).$$

Ранее нами суммировались и сопротивления шести кольцевых зон, но разница дебитов шести кольцевых зон и четырех кольцевых зон оказалась незначительной.

Значения гидропроводности звеньев координатной сетки возле нагнетательной скважины (всего 4 звена) определяются как обратные сопротивлению величины:

$$kMx_{1,1} = kMy_{1,1} = 0,25 / I_H.$$

Общий дебит скважины q_H находится как сумма дебитов по каждому из звеньев

$$q_H = \frac{1}{I_H} \left(P_H - \frac{P_{12} + P_{21}}{2} \right).$$

Выводы

В инженерных расчетах при площадном заводнении очень часто многослойный пласт представляют как пласт с усредненной проницаемостью и эффективной мощностью, равной сумме значений толщины всех пропластков.

Приведем результаты выработки пластов, содержащих парафинистые нефти, при неизотермическом вытеснении нефти водой с учетом слоистой неоднородности пласта, а также проницаемости коллектора в постановке [4].

Рассмотрен 5-слойный пласт с мощностью пропластков в метрах 7,5; 2,3; 3,5; 3,5; 5,0. Мощность глинистых пропластков-перемычек по 0,5 м, проницаемость соответственно 0,36; 0,3; 0,01; 0,19; 0,1. Пористость всех пропластков 0,22.

При вытеснении холодной водой (15 °С) для 5-слойного пласта с учетом структурных свойств коэффициент извлечения нефти составляет 34,2 %, а для однородного, суммарно той же мощности – 41,8 %. Если не учитывать структурные свойства, то соответственно 35,9 и 44,6 %.

Следует отметить, что разработка месторождений высоковязких парафинистых нефтей, а также расчет показателей вытеснения нефти водой в многослойных пластах должны проводиться с учетом теории неизотермической фильтрации [1, 3, 4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алишаев М. Г., Розенберг М. Д., Теслюк Е. В. Неизотермическая фильтрация при разработке нефтяных месторождений. М.: Недра, 1985. 271 с.
2. Алишаев М. Г., Ахмедов С. А. Неизотермическое вытеснение парафинистой нефти при трехрядной системе размещения скважин с учетом межслойного обмена // Нефтяное хозяйство. 1998. № 11. С. 31–32.
3. Ахмедов С. А., Алисултанов Р. М. Компьютерное моделирование процесса неизотермического вытеснения вязкопластичной нефти в многослойном пласте // Нефтяное хозяйство. 1999. № 12. С. 38–41.
4. Ахмедов С. А., Ахмедова З. Х., Ахмедова Х. Г. Влияние слоистой неоднородности пласта на показатели разработки при неизотермическом вытеснении парафинистой нефти водой // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2016. № 1 (61). С. 14–21.

Статья поступила в редакцию 31.03.2017

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ахмедов Сулейман Абдурагимович – Россия, 367000, Махачкала; Дагестанский государственный университет; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры информатики и информационных технологий; ahmedovsa@mail.ru.

Ахмедова Зухра Халипаевна – Россия, 368300, Каспийск; филиал Дагестанского государственного университета; канд. физ.-мат. наук, доцент; доцент кафедры информатики и информационных технологий; zuhrik7373@rambler.ru.

Ахмедова Хамида Гаджиалиевна – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. физ.-мат. наук, доцент; доцент кафедры высшей и прикладной математики; h.ahmedova@mail.ru.



S. A. Akhmedov, Z. Kh. Akhmedova, Kh. G. Akhmedova

CALCULATION OF THE TEMPERATURE FIELD IN THE PROBLEMS OF DISPLACEMENT OF PARAFFIN OIL BY WATER IN A MULTILAYER FORMATION

Abstract. Under thermal flooding of strata, the temperature conditions in the reservoirs are formed mainly in the process of heat exchange between the injected fluid and reservoir with the

surrounding rocks. Heat transfer in the strata is composed of conduction through the solid porous skeleton, conduction and convection through the pores and other factors. Particularly acute appears the need to analyze temperature fields and recovery of reservoirs saturated with paraffin. Methodological issues that arise when analyzing temperature fields, pressure and oil saturation should be carefully handled, with special concern to multilayer formations. It is necessary to consider the heat exchange between the reservoir and the surrounding rocks. The article offers the technique of calculating temperature fields and the oil saturation with oil displacement by water in multilayer formations taking into account heat transfer through the roof and sole.

Key words: formation, mathematical modeling, thermal flooding, indicators, heat exchange.

REFERENCES

1. Alishaev M. G., Rozenberg M. D., Tesliuk E. V. *Neizotermicheskaja fil'tratsiia pri razrabotke neftiannykh mestorozhdenii* [Non-isothermal filtration in oil development]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 271 p.
2. Alishaev M. G., Akhmedov S. A. Neizotermicheskoe vytesnenie parafinistoi nefi pri trekhriadnoi sisteme razmeshcheniia skvazhin s uchetom mezhstoinogo obmena [Non-isothermal displacement of paraffin oil with three-row arrangement of wells subject to interlayer exchange]. *Neftianoe khoziaistvo*, 1998, no. 11, pp. 31-32.
3. Akhmedov S. A., Alisultanov R. M. Komp'uternoe modelirovanie protsessa neizotermicheskogo vytesneniia viazkoplastichnoi nefi v mnogostoinom plaste [Computer simulation of non-isothermal displacement of viscoplastic oil in the multilayer formation]. *Neftianoe khoziaistvo*, 1999, no. 12, pp. 38-41.
4. Akhmedov S. A., Akhmedova Z. Kh., Akhmedova Kh. G. Vliianie sloistoi neodnorodnosti plasta na pokazateli razrabotki pri neizotermicheskom vytesnenii parafinistoi nefi vodoi [The influence of the stratum multilayered heterogeneity on the development results under non-isothermal displacement of paraffin oil by water]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 1 (61), pp. 14-21.

The article submitted to the editors 31.03.2017

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akhmedov Suleiman Abduragimovich – Russia, 367000, Makhachkala; Dagestan State University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Informatics and Information Technologies; ahmedovsa@mail.ru.

Akhmedova Zuhra Khalipaevna – Russia, 368300; Kaspiysk; branch of Dagestan State University; Candidate of Physics and Mathematics, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Informatics and Information Technologies; zuhrik7373@rambler.ru.

Akhmedova Khamida Gadzhialievna – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Physics and Mathematics, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of the Higher and Applied Mathematics; h.ahmedova@mail.ru.

