

УДК 532.536

О ПОЛИМЕРНОМ ЗАВОДНЕНИИ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ С ПОДОШВЕННОЙ ВОДОЙ

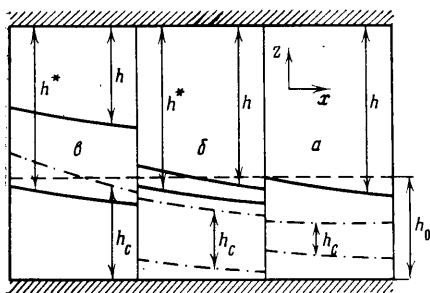
ЗАЙДЕЛЬ Я. М.

Предложена квазиодномерная модель, описывающая процесс полимерного заводнения нефтяных пластов, подстилаемых подошвенной водой. Она основана на предположении о мгновенном гравитационном разделении фаз по вертикали и является обобщением гидродинамической модели, рассмотренной ранее в [1]. Построенные автомодельные решения показывают, что при полимерном заводнении нефтяного пласта наличие подошвенной воды приводит к качественным изменениям в распределении насыщенности и концентрации и существенным образом влияет как на текущую, так и на конечную нефтеотдачу. Полученные результаты согласуются с данными двумерного численного моделирования рассматриваемого процесса [2] и свидетельствуют о возможности повышения эффективности разработки водонефтяных зон путем закачки в пласт загущенной воды.

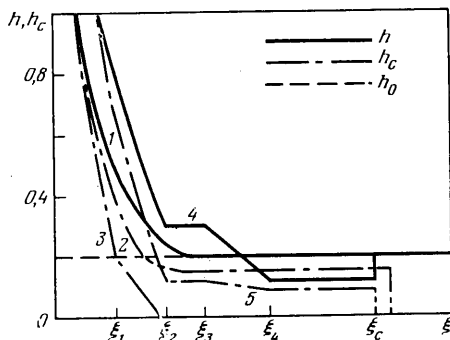
1. Рассмотрим процесс вытеснения нефти водным раствором полимера из горизонтального однородного пласта, подстилаемого подошвенной водой. Примем следующие допущения: 1) течение происходит в условиях мгновенного установления гравитационного равновесия фаз по вертикали, в начальный момент времени ниже границы раздела нефти и воды ($z=h_0$) нефтенасыщенность равна нулю, а выше — начальной s ; 2) в каждой точке пласта величина остаточной нефтенасыщенности составляет s_0 , а количество связанной воды — $1-s$; 3) капиллярными и диффузионными эффектами, а также изменением по вертикали составляющей градиента давления в горизонтальном направлении пренебрегается; 4) раствор полимера, имеющий концентрацию c , не поступает в область с остаточной нефтенасыщенностью в данном сечении, пока не заполнит зону с нулевой нефтенасыщенностью.

Последнее условие означает, что полимерный раствор,двигающийся в зоне, промытой водой, в первую очередь устремляется в нижнюю, наиболее водопроницаемую часть пласта. Это подтверждается результатами численного решения рассматриваемой задачи в двумерной постановке [2]. Остальные принятые допущения соответствуют пренебрежению в модели двухфазной трехкомпонентной фильтрации, описывающей процесс полимерного заводнения, разностью в перепадах давлений на кровле и на подошве пласта и временем гравитационного разделения фаз по сравнению со временем вытеснения; последнее в свою очередь считается меньше характерного времени диффузионного и капиллярного перераспределений компонентов по толщине пласта. Нетрудно убедиться в том, что эти условия не являются противоречивыми, а приводят к определенным ограничениям на значения исходных геолого-физических параметров.

Введем обозначения: $h(x, \tau)$ — расстояние от кровли пласта до текущего положения водонефтяного контакта (поверхности S), $h^*(x, \tau)$ — максимальное за время τ значение h при фиксированном x , $h_c(x, \tau)$ — толщина зоны, занятой полимерным раствором, M_1 — подвижность нефтяной фазы, M_2, M_{21} — подвижности воды и раствора полимера соответственно при остаточной нефтенасыщенности, M_2^*, M_{21}^* — подвижности воды и рас-



Фиг. 1



Фиг. 2

творя полимера соответственно при нулевом значении нефтенасыщенности, x, τ — безразмерные пространственная и временная координаты, $a(c)$ — концентрация сорбированного полимера, m — пористость.

Рассмотрим схематично процесс заводнения раствором полимера пласта с подошвенной водой. За счет уменьшения подвижности водной фазы, в первую очередь в водонасыщенной части разреза, происходит перераспределение фильтрационных потоков по толщине пласта и возрастает по сравнению с обычным заводнением скорость движения водонефтяного контакта. Это может привести к формированию зоны с валом нефти, перемещающимся в области, первоначально насыщенной водой [2] (Фиг. 1, а, штриховая линия — начальное положение водонефтяного контакта, сплошная — текущее положение контакта, штрихпунктирная — граница зоны с полимерным раствором). В той части пласта, где поверхность раздела S расположена выше начального уровня, можно выделить еще две зоны. В одной из них $h_c < 1 - h^*$ (Фиг. 1, б), а в другой — $h_c > 1 - h^*$ (Фиг. 1, в). Уравнения баланса нефти и реагента имеют вид

$$s \frac{\partial h}{\partial \tau} = - \frac{\partial f_{11}}{\partial x}, \quad (1+\lambda) \frac{\partial h_c}{\partial \tau} = - \frac{\partial f_{c1}}{\partial x} \quad (1.1)$$

$$(s-s_0) \frac{\partial h}{\partial \tau} = - \frac{\partial f_{12}}{\partial x}, \quad (1+\lambda) \frac{\partial h_c}{\partial \tau} = - \frac{\partial f_{c2}}{\partial x} \quad (1.2)$$

$$(s-s_0) \frac{\partial h}{\partial \tau} = - \frac{\partial f_{13}}{\partial x}, \quad (1-s_0+\lambda) \frac{\partial h_c}{\partial \tau} = - \frac{\partial f_{c3}}{\partial x} \quad (1.3)$$

$$\lambda = \frac{a}{mc}, \quad f_{1n} = \frac{M_1 h}{A_n}, \quad n=1, 2, 3$$

$$f_{c1} = \frac{M_{21}^* h_c}{A_1}, \quad f_{c2} = \frac{M_{21}^* h_c}{A_2}, \quad f_{c3} = \frac{M_{21} h_c + (M_{21}^* - M_{21})(1-h^*)}{A_3}$$

$$A_1 = M_1 h + M_2^*(1-h-h_c) + M_{21}^* h_c,$$

$$A_2 = M_1 h + (h^* - h) M_2 + (1-h^* - h_c) M_2^* + h_c M_{21}^*$$

$$A_3 = M_1 h + M_2(1-h-h_c) + M_{21}(h_c + h^* - 1) + M_{21}^*(1-h^*)$$

Уравнения (1.1), (1.2), (1.3) выполняются в зонах а, б, в (Фиг. 1) соответственно. Функции f_{11}, f_{12}, f_{13} , входящие в правые части этих уравнений, представляют собой доли нефти в потоке, а f_{c1}, f_{c2}, f_{c3} — доли полимерного раствора в потоке.

Будем искать решения приведенной выше системы уравнений при следующих начальных и граничных условиях:

$$h(x, 0) = 1 - h_0, \quad h_c(x, 0) = h(0, \tau) = 0, \quad h_c(0, \tau) = 1 \quad (1.4)$$

Переходя к автомодельной переменной $\xi = x/\tau$, (1.1)–(1.4) перепишем в виде

$$s\xi \frac{dh}{d\xi} = \frac{df_{11}}{d\xi}, \quad (1+\lambda)\xi \frac{dh_c}{d\xi} = \frac{df_{c1}}{d\xi} \quad (1.5)$$

$$(s-s_0)\xi \frac{dh}{d\xi} = \frac{df_{12}}{d\xi}, \quad (1+\lambda)\xi \frac{dh_c}{d\xi} = \frac{df_{c2}}{d\xi} \quad (1.6)$$

$$(s-s_0)\xi \frac{dh}{d\xi} = \frac{df_{13}}{d\xi}, \quad (1-s_0+\lambda)\xi \frac{dh_c}{d\xi} = \frac{df_{c3}}{d\xi} \quad (1.7)$$

$$h(\infty) = 1-h_0, \quad h_c(\infty) = h(0) = 0, \quad h_c(0) = 1$$

2. Рассмотрим вначале простейший случай – течение нефти и воды, содержащей пассивную примесь, не влияющую на подвижность водного раствора. В этом случае процесс вытеснения нефти происходит за счет постепенного подъема водонефтяного контакта и описывается первым из уравнений (1.6) или (1.7). Его решение при $h^* = 1-h_0$, $M_{21}^* = M_2^*$, $M_{21} = M_2$ имеет вид (фиг. 2, кривая 1)

$$h(\xi) = \{M_2 + (M_2^* - M_2)(1-h_0) - \sqrt{M_1[M_2 + (M_2^* - M_2)(1-h_0)]/\xi(s-s_0)}\} / (M_2 - M_1) \quad (2.1)$$

При выполнении условия

$$h_0 > \frac{M_1[M_2^*(1+\lambda) - M_2(s-s_0)]}{M_2^*(M_2^* - M_1)(s-s_0) + M_1(M_2^* - M_2)(1+\lambda)} \quad (2.2)$$

распределение пассивной примеси будет следующим (фиг. 2, кривая 2):

$$h_c(\xi) = \alpha_{k-1} + \beta_{k-1}/\sqrt{\xi}, \quad \gamma_{k-1} < \xi < \gamma_k, \quad k=1, 2, \dots, 5 \quad (2.3)$$

$$\gamma_0 = \beta_0 = \beta_3 = \beta_4 = \alpha_4 = 0, \quad \alpha_0 = 1, \quad \alpha_3 = h_{c0}, \quad \beta_1 = \beta_2 = \beta, \quad \gamma_5 = \infty$$

Постоянные α_1 , α_2 , β , h_{c0} , γ_1 , γ_2 , γ_3 , γ_4 находятся подстановкой (2.1) и (2.3) во второе из уравнений (1.6) и (1.7) с учетом соотношений

$$h_c(\gamma_1) = 1, \quad h_c(\gamma_2) = h_0, \quad h_c(\gamma_3) = 1-h_{c0} \\ \gamma_4 = M_2^* h_{c0} / [M_2^* h_0 + M_1(1-h_0)]$$

Если же условие (2.2) не выполняется, то движение примеси по подошве пласта происходит медленнее, чем перемещение водонефтяного контакта при $h = 1-h_0$, и в распределении $h_c(\xi)$ исчезает участок, соответствующий $h_c = \text{const} \neq 0$ (фиг. 2, кривая 3).

Проследим за тем, как меняется характер получающегося решения в случае применения активной примеси по мере уменьшения подвижности раствора.

Предположим, что наличие примеси в воде приводит к некоторому снижению ее подвижности ($M_{21} < M_2$, $M_{21}^* < M_2^*$). Кроме этого, будем считать выполненным неравенство (2.2). Тогда скачок h_c от h_c^- до 0 будет сопровождаться скачком h в этой точке от некоторого $h^- = h^*$ до $1-h_0$ (фиг. 2, кривые 4, 5). Нетрудно показать, что непрерывного перехода от h^- к $1-h_0$ не может быть. Условия на скачке имеют вид

$$sh^- \xi_c = f_{11}^- - f_{11}^+, \quad (1+\lambda)\xi_c h_c = f_{c1}^- \quad (2.4)$$

где ξ_c – скорость скачка, f_{11}^+ – значение функции f_{11} перед скачком, f_{11}^- , f_{c1}^- – значения соответствующих функций за скачком.

Слева к этому скачку примыкает участок постоянства h и h_c ($\xi_4 < \xi < \xi_c$), затем следуют два участка непрерывного изменения h и h_c ($\xi_3 \leq \xi \leq \xi_4$, $\xi_1 \leq \xi \leq \xi_2$), разделенные еще одним участком решения с постоянными значениями переменных: $h_c = 1-h^-$, $h = h^*$ ($\xi_2 \leq \xi \leq \xi_3$). Наличие этого

участка связано с тем, что при $h_c < 1 - h^-$ процесс описывается уравнениями (1.6), а при $h_c > 1 - h^-$ — уравнением (1.7). Покажем, что на участке непрерывного изменения h и h_c имеет место линейная связь между переменными. Рассмотрим в качестве примера решение при $\xi_1 \leq \xi \leq \xi_2$. Уравнения (1.6) в этой области могут быть сведены к одному обыкновенному дифференциальному уравнению

$$hh_c' = h_c + (C - Dh_c') / (Ah_c' + B) \quad (2.5)$$

$$h_c' = \frac{dh_c}{dh}, \quad A = M_1(M_2 - M_{21})(1 - s_0 + \lambda), \quad B = M_{21}(M_2 - M_1)(s - s_0),$$

$$C = (M_2 - M_1)(M_{21}' - M_{21})(s - s_0),$$

$$D = M_1(M_{21}' + M_2 - M_{21})(1 - s_0 + \lambda) - M_2 M_{21}'(s - s_0),$$

$$M_{21}' = M_{21}h^- + M_{21}^*(1 - h^-)$$

Уравнение (2.5) — уравнение Клеро [3], одно из решений которого имеет вид

$$h_c = a_0 h + (C - Da_0) / (Aa_0 + B) \quad (2.6)$$

Другое возможное решение не удовлетворяет граничному условию при $\xi = \xi_1$, а переход с одного решения на другое возможен в рассматриваемом случае только при $M_{21} > M_2$. Подставляя в (2.6) значения $h_c = 1$, $h = 0$, находим

$$a_0 = (M_1 - M_2)(s - s_0) / [M_2(s - s_0) - M_1(1 - s_0 + \lambda)] \quad (2.7)$$

Отметим, что такая же связь между h_c и h имеет место и при $h_0 = 0$ [4]. Аналогичным образом искомые функции связаны и в области $\xi_3 \leq \xi \leq \xi_4$

$$h_c = a_1 h + a_1(D_1 - D_2 h^-) / (E_1 a_1 + E_2) \quad (2.8)$$

$$D_1 = \left(\frac{M_1}{s - s_0} - \frac{M_{21}^*}{1 + \lambda} \right) M_2^*, \quad D_2 = - \left(\frac{M_1}{s - s_0} - \frac{M_{21}^*}{1 + \lambda} \right) M_2$$

$$E_1 = M_1 \frac{M_2^* - M_{21}^*}{s - s_0}, \quad E_2 = M_{21}^* \frac{M_2 - M_1}{1 + \lambda}$$

Для определения h_c^- , h^- , h_* , a_1 имеем следующую систему алгебраических уравнений:

$$\frac{f_{11}^+ [M_1 h^- + M_2^* (1 - h^- - h_c^-) + M_{21}^* h_c^-] - M_1 h^-}{s(1 - h_0 - h^-)} = \frac{M_{21}^* h_c^-}{1 + \lambda}$$

$$a_0 h_* + h^- = 0, \quad 1 - h^- = a_1 h_* + \frac{a_1(D_1 - D_2 h^-)}{E_1 a_1 + E_2} \quad (2.9)$$

$$h_c^- = a_1 h^- + \frac{a_1(D_1 - D_2 h^-)}{E_1 a_1 + E_2}, \quad f_{11}^+ = \frac{M_1(1 - h_0)}{M_1(1 - h_0) + M_2^* h_0}$$

Первое из уравнений (2.9) представляет собой соотношение на скачке в точке $\xi = \xi_c$, полученное из (2.4); второе, третье и четвертое определяют связь между h и h_c при $\xi = \xi_2$, ξ_3 и ξ_4 соответственно.

Система (2.9) может быть сведена к одному квадратному уравнению относительно h_c^-

$$p(h_c^-)^2 + qh_c^- + r = 0 \quad (2.10)$$

$$p = dt - gk, \quad q = lg + kw - du - vt, \quad r = vu - wl,$$

$$k = \mu - \nu, \quad d = \frac{\nu + a_0 \mu}{a_{01} \nu}, \quad t = E_1(\mu - \nu) + E_2 \mu \frac{a_{01}}{a_0}$$

$$g = \frac{D_2 \mu}{v}, \quad w = D_2 \left(1 + \frac{l}{v} \right) - D_1, \quad u = E_1 l + E_2 (l + v) \frac{a_{01}}{a_0}$$

$$v = \frac{la_0}{a_{01} v}, \quad l = \frac{M_{21}^* s h_0}{1 + \lambda} - M_1 (1 - f_{11}^+), \quad v = M_1 (1 - f_{11}^+) + M_2^* f_{11}^+ - \frac{M_{11}^* s}{1 + \lambda}$$

$$\mu = (M_2^* - M_{21}^*) f_{11}^+, \quad a_{01} = 1 + a_0$$

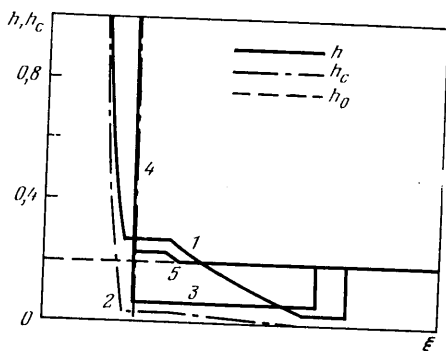
Если снижение подвижности водной фазы за счет добавки в нее полимера оказывается таким, что выполняется условие

$$\frac{M_{21}^*}{M_2^*} < \frac{(1 + \lambda) M_1}{s [M_1 (1 - h_0) + M_2^* h_0]} \quad (2.11)$$

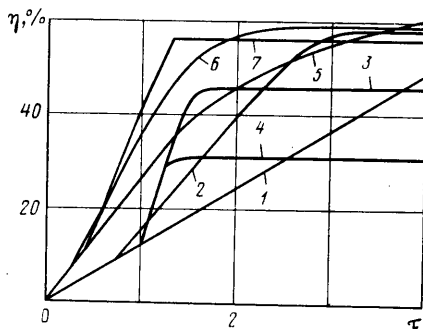
то фронт химреагента, распространяющийся по подошвенной части пласта, начинает отставать от образующегося нефтяного вала (фиг. 3, кривые 1, 2). Максимальное значение h^* в зоне вала в этом случае определяется по формуле

$$h^* = 1 - \frac{M_1 [M_2 (1 + \lambda) - M_{21}^* (s - s_0)]}{M_{21}^* (M_2^* - M_1) (s - s_0) - M_1 (1 + \lambda) [(M_2^* - M_{21}^*) a_{01}^{-1} - M_2 + M_{21}^*]} \quad (2.12)$$

Из (2.11) следует, что при фиксированном значении параметра M_{21}^*/M_2^* решение с валом нефти, опережающим фронт химреагента, не образуется при достаточно больших значениях h_0 или средней по толщине пласта начальной водонасыщенности. Аналогичная особенность имеет место и при доотмыве нефти раствором активной примеси в случае одномерного течения [4].



Фиг. 3



Фиг. 4

При дальнейшем уменьшении M_{21}^* и M_{21} участки непрерывного изменения h и h_c переходят в скачки. Участок непрерывного решения, примыкающий справа к области с граничными значениями $h=0$, $h_c=1$, переходит в скачок, если имеет место неравенство

$$M_{21} < M_1 (1 - s_0 + \lambda) / (s - s_0) \quad (2.13)$$

Аналогичный участок, примыкающий слева к нефтяному валу, становится скачком при

$$M_{21}^* < M_1 (1 + \lambda) / (s - s_0) \quad (2.14)$$

Если оба условия (2.13) и (2.14) выполняются, то в решении имеет место полный скачок h_c ($h_c^+ = 0$, $h_c^- = 1$). Распределение h при этом может быть двух типов: с наличием вала нефти, затекающей под начальный уровень водонефтяного контакта, и без него (фиг. 3, кривые 3 и 5 соответственно). В первом случае значение h^+ впереди скачка определяется по формуле

$$h^+ = 1 - M_1 (1 - s + \lambda) / [M_2^* (s - s_0) - M_1 s] \quad (2.15)$$

а во втором —

$$h^+ = \frac{M_1(1-s+\lambda) + h_0[M_1s_0 - (M_2^* - M_2)(s-s_0)]}{(M_2 - M_1)(s-s_0)} \quad (2.16)$$

Вал нефти при наличии полного скачка h_c не образуется, если имеет место неравенство

$$h_0 < M_1(1-s+\lambda) / [M_2^*(s-s_0) - M_1s] \quad (2.17)$$

Отметим, что (2.17) может выполняться одновременно с (2.2). Это означает, что при достаточно малых значениях h_0 и небольшом снижении подвижности водной фазы водонефтяной контакт опускается ниже начального уровня, а при более значительном изменении подвижности остается выше его. Этот результат объясняется тем, что с уменьшением подвижности раствора снижается скорость переноса полимера по подошвенной части пласта, что способствует при выполнении условия (2.14) уменьшению, а при небольшой величине h_0 — исчезновению нефтяного вала.

Покажем, что в том случае, когда неравенство (2.2) меняется на противоположное, распределение $h(\xi)$ является монотонным, т. е. вал нефти не формируется. Предположим противное. Это означает, что одновременно должны выполняться неравенства, обратные к (2.2) и (2.17). Последнее может иметь место лишь при

$$M_2^*/M_2 < [1-s_0/(1+\lambda)]^{-1} < 1/(1-s_0) \quad (2.18)$$

Заметим, что отношение M_2/M_2^* представляет собой значение относительной фазовой проницаемости для воды при остаточной нефтенасыщенности s_0 . Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о том, что относительная фазовая проницаемость меньше соответствующего значения насыщенности, что противоречит (2.18). Следовательно, при положительной правой части (2.2) и при достаточно малых значениях h_0 текущее положение водонефтяного контакта будет всегда не ниже начального уровня, т. е. не будет дополнительных потерь нефти, связанных с замещением ею части подошвенной воды.

3. Остановимся на некоторых результатах проведенных расчетов при следующих значениях исходных параметров: $h_0=0,5$, $\lambda=0,5$, $s=0,8$, $s_0=0,3$, $M_2/M_1=8$, $M_2^*/M_1=20$. Значение фактора сопротивления $R=M_2^*/M_{21}^*=M_2/M_{21}$ принималось равным 1 (обычное заводнение), 2, 4 и 8. Соответствующие зависимости количества отобранной нефти из пласта η (в долях от ее начального объема) от количества отобранной жидкости (в долях от объема пор пласта) τ представлены на фиг. 4 (кривые 1–4 соответственно). Сравнение этих кривых показывает, что в рассматриваемых условиях влияние закачки полимерного раствора на количество отобранной нефти начинает проявляться при $\tau \approx 1$ при всех значениях $R \geq 2$. Увеличение текущего количества отобранной нефти по сравнению с обычным заводнением при одинаковом значении τ достигает 20–25%. Однако при $R \geq 4$ заметно снижается конечная величина накопленного отбора нефти за счет частичного оттока ее в нижнюю часть пласта и последующего неполного вытеснения нефти водой. Так, если при $R=2$ уменьшение конечного значения η (при $\tau \rightarrow \infty$) составляет 2,5%, то при $R=4$ — 15%, а при $R=8$ — 31%.

Достаточно высокая эффективность применения полимерных растворов с относительно небольшим фактором сопротивления ($R=2$) при разработке нефтяных пластов, содержащих подошвенную воду, объясняется следующим. При закачке раствора полимера увеличивается скорость вытеснения нефти главным образом из-за повышения фильтрационного сопротивления первоначально водонасыщенной части пласта. Однако при $R \geq 4$ увеличение сопротивления происходит преимущественно за счет образующегося в этой области вала нефти, а при $R < 4$ — за счет движения полимерного раствора под начальным уровнем водонефтяного контакта. Так, при $R=2$ относительная толщина зоны занятой полимерным раствором на фронте его движения в водонасыщенной части пласта составляет 0,8, а толщина зоны с нефтью, поступившей в эту часть пласта, равна 0,11. При $R=4$ эти величины равны соответственно 0,46 и 0,43, а при $R=8$ — 0 и 0,84. С уменьшением значения h_0 влияние параметра R на конечную величину накопленного отбора нефти снижается (фиг. 4; кривые 5, 6, 7 соответствуют расчетам со значениями $R=1, 2, 4$ при $h_0=0,2$).

Таким образом, проведенные исследования показывают, что полимерное заводнение водонефтяных зон может привести как к положительным, так и к отрица-

тельными последствиям: с одной стороны, происходит увеличение скорости вытеснения нефти в верхней части пласта, а с другой — затекание некоторого количества нефти в нижнюю водонасыщенную область. Полученные формулы позволяют оценить влияние различных факторов на характер движения нефти, воды и реагента по пласту и выбрать максимально допустимую величину фактора сопротивления, не приводящую к заметному снижению конечной нефтеотдачи и увеличивающую текущий отбор нефти по сравнению с обычным заводнением.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зайдель Я. М., Леви Б. И.* Вытеснение нефти растворами активной примеси из однородного пласта с учетом гравитационных сил. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1984, № 1, с. 87–92.
2. *Леви Б. И., Санкин В. М.* Эффективность полимерного заводнения водонефтяных зон. — Нефт. хоз-во, 1984, № 4, с. 44–47.
3. *Камке Э.* Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1971. 576 с.
4. *Ентов В. М.* Физико-химическая гидродинамика процессов в пористых средах. (Математические модели повышения нефтеотдачи пластов). Препринт № 161. М.: Ин-т пробл. механ. АН СССР, 1980. 63 с.

Уфа

Поступила в редакцию
8.11.1985