

## ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК 532.546

В. Б. ТАРАНЧУК

О ПОСТАНОВКЕ И МЕТОДЕ РАСЧЕТА ЗАДАЧИ  
МИЦЕЛЛЯРНО-ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ

(Представлено академиком АН БССР В. И. Крыловым).

В настоящей работе развивается гидродинамическая модель процесса мицеллярно-полимерного вытеснения остаточной нефти. Технология этого перспективного метода третичной нефтедобычи включает последовательную закачку оторочек опресняющей воды, мицеллярного раствора, загущенного полимером водного раствора и проталкивающей эти оторочки воды (1). В предлагаемой модели учитываются конвективный и диффузионный перенос содержащихся в нагнетаемых оторочках солей, поверхностно-активного вещества (ПАВ) и полимера; адсорбция ПАВ и полимера на породе пласта; влияние добавок примесей и скорости вытеснения на вязкость водной фазы, относительные фазовые проницаемости, остаточную нефтенасыщенность, насыщенность связанной воды. Предполагается, что в любом элементе объема пористой среды присутствуют не более чем две жидкостные фазы — водная и нефтяная, фильтрация изотермическая, пласт недеформируемый, жидкости несжимаемые, вытеснение несмешивающееся, химические реакции не происходят, примеси в фазах находятся в статическом равновесии.

Уравнения, описывающие процесс мицеллярно-полимерного заводнения, могут быть получены из законов фильтрации, уравнений неразрывности фаз и переноса массы примесей (2, 3). Для простоты изложения приведем постановку задачи в случае одномерной линейной фильтрации в горизонтальном пласте длины  $L$ .

Так как в практике нефтедобычи имеют место крупномасштабные фильтрационные движения, градиент капиллярного давления в сравнении с вязкими силами пренебрежимо мал. Поэтому, не учитывая капиллярный скачок давления, из законов фильтрации и уравнений неразрывности вытесняемой и вытесняющей жидкостей для определения гидродинамического давления  $p$  и водонасыщенности  $s$  нетрудно получить (2):

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \left( u = -k \left( \frac{f_1}{\mu_1} + \frac{f_2}{\mu_2} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$m \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \left( F = \frac{f_2}{\mu_2} \left( \frac{f_1}{\mu_1} + \frac{f_2}{\mu_2} \right)^{-1} \right), \quad (2)$$

где  $t$ ,  $x$  — время и координата,  $t \geq 0$ ,  $0 \leq x \leq L$ ,  $k$  и  $m$  — абсолютная проницаемость и пористость пласта,  $f_i$  — относительные фазовые проницаемости,  $\mu_i$  — вязкости, индексы  $i=1$  и  $2$  относятся соответственно к нефтяной и водной фазам,  $u$  — суммарная скорость фильтрации,  $F$  — функция Леверетта, выражающая долю водной фазы в суммарном потоке.

Рассмотрим уравнения массопереноса примесей. Пусть  $c_{ij}$  и  $D_{ij}$  — концентрация и коэффициент диффузии  $j$ -й примеси в  $i$ -й фазе, индексы  $j=1, 2$  и  $3$  соответственно относятся к соли, ПАВ и полимеру. Предполагая, что коэффициенты конвективной диффузии являются известными функциями  $D_{ij}=D_{ij}(c_{ij})$ , отношения концентраций примесей в нефтяной и водной фазах  $\alpha_j=c_{1j}/c_{2j}$  — постоянные, из уравнения переноса массы (3) для  $j$ -й примеси получаем

$$m \frac{\partial}{\partial t} \{[s + \alpha_j(1 - s)] c_{2j}\} + \frac{\partial a_j}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} \{[F + \alpha_j(1 - F)]c_{2j}\} = \\ = m \frac{\partial}{\partial x} \left\{ [sD_{2j} + \alpha_j(1 - s) D_{1j}] \frac{\partial c_{2j}}{\partial x} \right\}, \quad (3)$$

где адсорбция принята равновесной и  $a_j$  — количество адсорбированной в единице объема  $j$ -й примеси.

Отметим некоторые особенности мицеллярно-полимерного вытеснения остаточной нефти, которые позволяют упростить уравнение (3).

Согласно технологической схеме моделируемого процесса заводнения, первой закачивается оторочка опресняющей воды, содержащая растворенную соль, которая может добавляться также в последующие нагнетаемые оторочки и проталкивающую воду. Известно, что соль не оказывает воздействия на твердый скелет пористой среды, поэтому в (3) при  $j=1$  полагаем  $\alpha_j=0$ .

За опресняющей водой нагнетается оторочка мицеллярного раствора, относительно малый объем которой может обеспечить почти полное вытеснение нефти из пласта при любой начальной нефтенасыщенности. Однако на вытесняющую способность мицеллярных оторочек отрицательно влияют адсорбция ПАВ породой пласта, взаимодействие с солями пластовой воды, внедрение воды со стороны заднего фронта, диффузия (4). Вследствие того что в условиях третичной нефтедобычи водонасыщенность относительно высока, адсорбция ПАВ из нефтяной фазы пренебрежимо мала по сравнению с адсорбцией из водной фазы. Поэтому в (3) при  $j=2$  учитывается адсорбция ПАВ только из водной фазы, величина которой может быть определена по аналогии с (5).

Для достижения благоприятного соотношения подвижностей и предохранения мицеллярной оторочки от разрушения языками проталкивающей воды вслед за ней нагнетается загуститель — раствор полимера. Растворимостью его в нефтяной фазе можно пренебречь (6), поэтому в (3) при  $j=3$   $\alpha_3=0$ . Адсорбция полимера до разрушения мицеллярной оторочки полностью подавлена ее присутствием (4), поэтому до разрушения  $\alpha_3=0$ , далее величина адсорбции может быть определена по аналогии с (5).

Таким образом, для определения давления, водонасыщенности и концентраций растворенных примесей имеем систему (1) — (3). Из уравнения (1), в частности, следует, что если суммарная скорость фильтрации  $u(t)$  известна (например, из граничных условий), то система (2) — (3) может быть исследована независимо.

Сформулируем начальные и граничные условия. Так как (1) — уравнение эллиптического типа относительно давления  $p$ , начальное распределение давления определять не требуется, а задаются

$$s(0, x) = s^*, c_{21}(0, x) = c_{21}^0, c_{2j}(0, x) = 0 \quad (j = 2, 3), \quad (4)$$

где  $1-s^*$  — остаточная нефтенасыщенность в пласте,  $c_{21}^0$  — начальная концентрация соли в пластовой воде.

На входе при  $x=0$  на протяжении всего процесса нагнетается только водная фаза, поэтому имеем

$$F = 1, c_{2j} = c_{2j}^*(t) \quad (j = 1, 2, 3), x = 0, t \geq 0, \quad (5)$$

где  $c_{2j}^*$  — известные функции времени  $t$  и  $c_{2j}^* = 0$ , когда  $j$ -я примесь не нагнетается. Дополнительно на входе задается либо давление  $p^0$ , либо суммарная скорость фильтрации  $u^0$ :

$$p(t, 0) = p^0, \text{ или } -k \left( \frac{f_1}{\mu_1} + \frac{f_2}{\mu_2} \right) \frac{\partial p}{\partial x} = u^0(t). \quad (6)$$

На выходе при  $x=L$ , так как (2) — уравнение в частных производных первого порядка относительно  $s$ , граничное условие для водонасыщенности не определяется. Пусть на выходе задано давление  $p_0$ . Не учитывая концевые эффекты, при  $x=L$  имеем

$$p(t, L) = p_0, \quad (7)$$

$$\partial c_{2j} / \partial x = 0 \quad (j = 1, 2, 3), x = L. \quad (8)$$

Важным этапом при построении математической модели процесса мицеллярно-полимерного заводнения является выбор достаточно адекватных натурным условиям зависимостей вязкостей фаз и относительных проницаемостей. В приведенных ниже выражениях в отличие от широко используемых в настоящее время зависимостей (4-6) учитывается влияние концентраций примесей и скорости вытеснения на вязкости фаз, относительные фазовые проницаемости, остаточную нефтенасыщенность и насыщенность связанной воды.

Так как рассматривается изотермическое вытеснение, вязкость нефтяной фазы  $\mu_1$  принимается постоянной. Относительно вязкости водной фазы, согласно (7, 8), считается, что добавление ПАВ и полимера в воду вязкости 1 сП приводит к следующему изменению вязкости:

$$\mu_2 = \mu_{23} + (\mu_{22} - \mu_{23}) c_{22} (c_{22} + c_{23})^{-1};$$

$$\mu_{22} = \exp(bc_{22}), c_{22} \leq v; \mu_{22} = 4, c_{22} > v;$$

$$\mu_{23} = \exp[0,013(10^4 c_{23})^r], r = 0,84u^{-0,13},$$

где  $c_{22}, c_{23}$  — процентные весовые концентрации,  $u$  — суммарная скорость фильтрации в см/с,  $b=230$ ,  $v = (\ln 4)/b$ .

Относительные фазовые проницаемости определяются по локальным значениям насыщенностей связанной воды  $s_*$  и остаточной нефти  $1-s^*$  с помощью следующих выражений (9):

$$f_1 = (s^* - s)^2 \exp[4,5(1 - s^*)], s \leq s^*; f_1 = 0, s > s^*;$$

$$f_2 = (s - s_*)^2, s \geq s_*; f_2 = 0, s < s_*.$$

Величины  $s_*$  и  $s^*$  вычисляются по локальному значению безразмерного капиллярного числа  $\omega = 0,01\mu_2 u / \sigma$ , где  $\sigma$  — межфазное натяжение в дин/см. Согласно (7, 10), принимается, что межфазное натяжение не может быть меньше 0,0003 дин/см и больше 30 дин/см; в промежутке между минимальным и максимальным значениями оно определяется по формуле

$$\sigma = 0,0454 [(\lg c_{22} - \lg z_{22})^2 + 10(\lg c_{21} - \lg z_{21})^2]^{3/2},$$

где  $z_{21}, z_{22}$  — известные константы, равные (7)  $z_{21} = 1\%$ ,  $z_{22} = 0,05\%$ . Остаточная нефтенасыщенность  $1-s^*$  и насыщенность связанной воды  $s_*$  принимаются равными и вычисляются по формулам (9, 11)

$$s_* = 0,280189 + 0,187062 \ln \omega + 0,036483 (\ln \omega)^2 + \\ + 0,0017562 (\ln \omega)^3, \quad 5 \cdot 10^{-5} \leq \omega \leq 0,02; \\ s_* = 0,3, \quad \omega < 5 \cdot 10^{-5}; \quad s_* = 0, \quad \omega > 0,02.$$

Сформулированная краевая задача достаточно сложна, ее решение в общем случае может быть осуществлено лишь с привлечением численных методов. Однако из-за нелинейности системы (1) — (3) и особенностей решений численное интегрирование остается также весьма трудной задачей. Для расчета решений был испытан ряд конечно-разностных аппроксимаций. Сопоставление результатов расчетов по разным схемам и сравнения с эталонными автомодельными решениями типа (4, 6) показали, что высоко эффективным является модифицированный метод расщепления по физическим процессам (12), согласно которому решения уравнений (1) — (3) с начальными и граничными условиями (4) — (8) на каждом временном слое рассчитываются последовательно без итераций по нелинейности. Зависящие от искомым решений коэффициенты в уравнениях вычисляются по значениям с предыдущего слоя. Уравнения массопереноса на каждом временном слое, как и уравнение Раппопорта — Лиса в (12), расщепляются, последовательно рассчитываются конвективный перенос достигнутых значений концентраций примесей и изменение концентраций вследствие диффузии. Для расчета распределений насыщенности и уравнений, описывающих конвективный перенос достигнутых на каждом временном слое значений концентраций, могут использоваться явные уголкового аппроксимации (13). Применение для этих уравнений схем второго и более высокого порядка точности приводит к таким же отрицательным эффектам (13), как и при решении задачи Баклея—Левретта.

Выражаю благодарность профессору Колорадского университета США Ф. В. Рамирезу за помощь в работе и профессору ИПМ АН СССР В. М. Ентову за полезное обсуждение работы.

### Summary

An efficient numerical simulator of micellar-polymer water-flooding process is developed.

### Литература

- <sup>1</sup> Хэрбек Э. Ф., Хейнтц Р. К., Хастингс Дж. Р. Инженер-нефтяник, 1976, № 6, с. 21—26. <sup>2</sup> Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа.— М.: Недра, 1972.— 286 с. <sup>3</sup> Лыков А. В. Тепломассообмен.— М.: Энергия, 1972.— 558 с. <sup>4</sup> Токарева Н. А., Цынкова О. Э. Изв. АН СССР. МЖГ, 1979, № 2, с. 63—70. <sup>5</sup> Бабаян Г. А., Сурков Ю. В., Леви Б. И. Труды Башкирского НИПИ нефтяной промышленности, 1975, вып. 41, с. 6—13. <sup>6</sup> Ентов В. М., Полищук А. М. Изв. АН СССР. МЖГ, 1975, № 3, с. 68—76. <sup>7</sup> Foster W. R. J. Petrol. Technol., 1973, vol. 25, N 2, p. 205—210. <sup>8</sup> Trushenski S. P., Dauben D. L., Parrish D. R. Soc. Petrol. Engrs. J., 1974, vol. 14, N 4, p. 633—642. <sup>9</sup> Talash A. W. Paper SPE5810 presented at SPE-AIME Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa Ohla, 22—24 March 1976. <sup>10</sup> Wilson P. M., Murphy C. L., Foster W. R. Paper SPE5812 presented at SPE-AIME Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa Ohla, 22—24 March 1976. <sup>11</sup> Taber J. J. Soc. Petrol. Engrs. J., 1969, vol. 9, N 1, p. 3—12. <sup>12</sup> Коновалов А. Н. Задачи фильтрации многофазной несжимаемой жидкости.— Новосибирск: Изд-во ВЦ СО АН СССР, 1972.— 128 с. <sup>13</sup> Королев А. В., Шалимов Б. В., Швидлер М. И. В сб.: Численные методы решения задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости.— Новосибирск: Изд-во ВЦ СО АН СССР, 1975, с. 137—154.

Белорусский государственный университет  
им. В. И. Ленина

Поступило 25.04.80

# ДОКЛАДЫ

## АКАДЕМИИ НАУК БССР

---

АВТОРСКИЙ ОТТИСК



25-Й ГОД ИЗДАНИЯ  
Том XXV, № 3

1981