



СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ

Динамика многофазных сред

НОВОСИБИРСК 1981

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ
МЕХАНИКИ

ДИНАМИКА МНОГОФАЗНЫХ
СРЕД

(материалы У Всесоюзного семинара
"Численные методы решения задач фильтрации многофазной
несжимаемой жидкости")

Под редакцией
академика Н.Н.Яненко

Новосибирск 1981

ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА МИЦЕЛЛЯРНОГО ВЫТЕСНЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ НЕФТИ

В.Б. Таранчук

В настоящей работе развивается гидродинамическая модель процесса мицеллярно-полимерного вытеснения остаточной нефти, предложен эффективный конечно-разностный метод решения возникающей краевой задачи.

Рассмотрим процесс мицеллярного заводнения применительно к условиям третичной нефтедобычи. Технология этого метода включает последовательную закачку оторочек оprzedняющей воды, мицеллярного раствора, загущенного полимером водного раствора и приталкивающей эти оторочки воды. Математическое моделирование данного процесса является сложной и многоплановой задачей вследствие наличия ряда перемещающихся химических агентов и взаимодействующих с пористой средой жидких фаз, из-за трудности описания механизма имеющих место физико-химических взаимодействий.

Для построения модели, которая может быть исследована, и в то же время воспроизводит основные качественные особенности изучаемого процесса, принимается ряд упрощающих предположений: фильтрация изотермическая, в любом элементе объема пористой среды присутствуют не более чем две жидкостные фазы - водная и нефтяная; пласт недеформируем, жидкости несжимаемые, вытеснение несмешивающейся, капиллярный скачок давления между фазами пре-небрежимо мал, химические реакции не происходят, примеси в фазах находятся в статическом равновесии.

При описании массопереноса выделим три основные примеси: соль, поверхностно-активное вещество (ПАВ) и полимер. Считается,

что соль не оказывает воздействия на твердый скелет пористой среды, ПАВ и полимер адсорбируются пористой средой и при этом адсорбция полимера до разрушения мицеллярной оторочки полностью подавлена ее присутствием [1]. Относительно наличия примесей в фазах примем, что полимер растворен только в водной [2], а соль и ПАВ присутствуют в обеих фазах, причем отношения концентраций примесей в нефтяной фазе к концентрациям в водной постоянны и равны α_j , где $j=1,2,3$ соответствуют соли, ПАВ и полимеру.

Уравнения, описывающие процесс мицеллярного заводнения, вытекают из законов фильтрации, уравнений неразрывности фаз и переноса массы примесей. В рамках сделанных допущений в плоском одномерном случае, когда задана суммарная скорость фильтрации u , для определения водонасыщенности S и концентраций примесей в водной фазе C_{2j} может быть получена следующая система (сравни [3]):

$$m \frac{\partial S}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial F}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$m \frac{\partial}{\partial t} \{[S+\alpha_1(1-S)]C_{21}\} + u \frac{\partial}{\partial x} \{[F+\alpha_1(1-F)]C_{21}\} = \quad (2)$$

$$= m \frac{\partial}{\partial x} \left\{ [S\mathcal{D}_{21} + \alpha_1(1-S)\mathcal{D}_{11}] \frac{\partial C_{21}}{\partial x} \right\},$$

$$m \frac{\partial}{\partial t} \{[S+\alpha_2(1-S)]C_{22}\} + u \frac{\partial}{\partial x} \{[F+\alpha_2(1-F)]C_{22}\} = \quad (3)$$

$$= m \frac{\partial}{\partial x} \left\{ [S\mathcal{D}_{22} + \alpha_2(1-S)\mathcal{D}_{12}] \frac{\partial C_{22}}{\partial x} \right\} + J_{12} + J_{22},$$

$$m \frac{\partial}{\partial t} (SC_{23}) + u \frac{\partial}{\partial x} (FC_{23}) = m \frac{\partial}{\partial x} (S\mathcal{D}_{23} \frac{\partial C_{23}}{\partial x}) + J_{23} \quad (4)$$

где t и x - время и пространственная координата, $0 \leq t \leq t_1$, $0 \leq x \leq l$, $F = f_2/\mu_2$, $f_1/\mu_1 + f_2/\mu_2$ - относительные фазовые проницаемости и вязкости фаз, индексы $i=1,2$ относятся к нефтяной и водной фазам, \mathcal{D}_{ij} - коэффициенты конвективной диффузии, J_{ij} - количество j -ой примеси, адсорбируемой породой пласта из i -ой фазы в единицу времени в единице объема, определяемые по аналогии с [2,4].

Для замыкания системы уравнений (1)-(4) задаются следующие начальные и граничные условия:

$$S(0, \infty) = S_0(\infty), \quad C_{2j}(0, \infty) = C_{02j}, \quad (5)$$

$$S(t, 0) = S^0(t), \quad C_{2j}(t, 0) = C_{02j}^0(t), \quad (6)$$

$$\frac{\partial C_{2j}}{\partial x} |_{x=l} = 0, \quad x=l, \quad (7)$$

где $S_0(\infty) = 1 - S_{02}$, S_{02} - остаточная нефтенасыщенность, $C_{022}=0$, $C_{023}=0$, $C_{02j}^0(t)$ - отличны от нуля, когда соответствующая оторочка нагнетается, $S^0(t)$ находится из уравнения $f_2 = 0$, т.к. считаем, что нагнетается только водная фаза.

Важным этапом при построении математической модели процесса является выбор достаточно адекватных натурным условиям зависимостей вязкостей фаз и относительных проницаемостей. В приведенных ниже выражениях в дополнение к широко используемым в настоящее время зависимостям ([2-5]) учитывается влияние концентраций примесей и скорости вытеснения на вязкость водной фазы, относительные фазовые проницаемости, остаточную нефтенасыщенность и насыщенность связанной воды. Вязкость нефтяной фазы считается постоянной, т.к. рассматривается изотермическое вытеснение.

Относительная вязкость водной фазы согласно [1,6] считается, что добавление ПАВ и полимера в воду вязкости I спз приводит к следующему изменению вязкости

$$\mu_2 = \mu_{23}^* (\mu_{22} - \mu_{23}) \cdot C_{22} \cdot (C_{22} + C_{23})^{-1},$$

$$\mu_{22} = \exp(\beta \cdot C_{22}), \quad C_{22} \leq 1, \quad \mu_{22} = 1, \quad C_{22} > 1,$$

$$\mu_{23} = \exp[0,013 \cdot (10^4 \cdot C_{23})^2], \quad z = 0,68 \cdot 10^{-0,013},$$

где C_{22}, C_{23} - процентные весовые концентрации ПАВ и полимера, скорость фильтрации и задается в см/сек, $\beta = 230$, $z = (\ln 4)/\beta$.

Относительные фазовые проницаемости определяются по локальным значениям насыщенностей связанной воды S_* и остаточной нефти S_{02} с помощью выражений [7,8]

$$f_1 = (1 - S_{02} - S)^2 \exp(4,5S_{02}), \quad S \leq 1 - S_{02}; \quad f_1 = 0, \quad S > S_{02};$$

$$f_2 = (S - S_*)^2, \quad S \geq S_*; \quad f_2 = 0, \quad S < S_*$$

Величины S_{02} и S_* вычисляются по локальному значению безразмерного капиллярного числа $\omega = 0,01 \cdot \mu_2 \cdot u / \sigma$, где σ - межфазное натяжение в дин/см. Согласно [6,9] принимается, что межфазное натяжение не может быть меньше 0,0003 дин/см и больше 30 дин/см; в промежутке между минимальным и максимальным

значениями σ вычисляется из

$$\sigma = 0,0454 \cdot [(lg c_2 - lg z_2)^2 + 10 \cdot (lg c_1 - lg z_1)^2]^{3/2},$$

где z_1, z_2 – задаваемые постоянные.

Остаточная нефтенасыщенность S_{02} и насыщенность связанной воды S_* принимаются равными и вычисляются по формулам [10, II]

$$S_* = 0,2801 + 0,1871 \ln w + 0,0365 (\ln w)^2 + 0,00176 (\ln w)^3, \quad 5 \cdot 10^{-5} \leq w \leq 0,02;$$

$$S_* = 0,3, \quad w < 5 \cdot 10^{-5}; \quad S_* = 0, \quad w > 0,022$$

Сформулированная краевая задача (I)–(7) достаточно сложна, и ее решение может быть получено лишь с привлечением численных методов. Приведем основные выводы, вытекающие из анализа численных решений, сравнения результатов расчетов по разным схемам и сопоставлений с построенным в частном случае автомодельным решением.

1. Установлено, что для расчета решений задачи (I)–(7) целесообразно использовать модификацию метода расщепления, предложенного и обоснованного применительно к задачам теории фильтрации в [12, 13]. Согласно данному методу уравнения (I)–(4) рассчитываются последовательно без итераций по нелинейности. Сравнения численных решений показывают, что разница решений, полученных с использованием схемы расщепления и полностью нелинейной итерационной схемы является величиной большего порядка, чем погрешность аппроксимации. Алгоритмы, основанные на использовании схемы расщепления, дают значительный выигрыш в затратах машинного времени и экономичны.

2. Для расчета распределений водонасыщенности, описываемых уравнением (I), испытывались монотонные и немонотонные разностные схемы (см., например, [14]). Показано, что схемы высокого порядка точности (Лакса–Бендроффа, крест и др.) дают неудовлетворительные результаты, т.к. неверно воспроизводятся насыщенности на скачках и их движение, а также имеют место осцилляции на профилях насыщенности в области водонефтяного вала.

Установлено, что удовлетворительные результаты могут быть получены при использовании для расчета водонасыщенности уголковых схем, ориентированных по характеристике. Сопоставления с построенными по методике [15] эталонными автомодельными решениями (в случае, когда дифузия пренебрежимо мала) показывают

достаточную точность таких решений.

3. По аналогии с [16] целесообразно на каждом временном слое расщеплять уравнения массопереноса, а затем последовательно аппроксимировать и поочередно рассчитывать уравнения, описывающие конвективный перенос и дифузию примесей. Найденные таким образом численные решения более точно воспроизводят движение фронтов концентрации примесей, чем решения, полученные по схемам, аппроксимирующими уравнения массопереноса без применения метода расщепления.

1. Trushenski S.P., Dauben D.L., Parrish D.R. Micellar Flooding-Fluid Propagation, Interaction and Mobility. SPEJ, 1974, vol.14, 633–642.
2. Ентов В.М., Полищук А.М. О роли сорбционных процессов при движении полимерных растворов в пористой среде. – Изв. АН СССР, МЖГ, 1975, № 3, 68–76.
3. Нигматулин Р.И., Сургучев М.Л., Хабеев Н.С., Шевцов В.А., Кулниев М.Я. Применение методов механики многофазных сред для математического моделирования процесса вытеснения нефти мицеллярными растворами. – Изв. АН Узб.ССР, серия техн. наук, 1979, № 2, 49–52.
4. Вахитов Г.Г., Кац Р.М., Оганджанянц В.Г., Полищук А.М., Суркова Е.М. Одномерное вытеснение нефти водными растворами сорбирующихся агентов с учетом межслойных перетоков. – Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, № 2, 38–45.
5. Токарева Н.А., Цынкова О.Э. О мицеллярно–полимерном заводнении нефтяных пластов в условиях необратимой сорбции. – Изв. АН СССР, МЖГ, 1979, № 2, 63–70.
6. Foster W.R. A Low-Tension Water flooding Process. JPT, 1973, vol.25, No.2, 205–210.
7. Lefebvre du Frey E.J. Factors Affecting Liquid-Liquid Relative Permeabilities of a Consolidated Porous Medium. SPEJ, 1973, vol.13, No.1, 39–47.
8. Talash A.W. Experimental and Calculated Relative Permeability Data for Systems Containing Tension Additives. Paper SPE5810

presented at SPE-AIME Symposium, Tulsa, Okla, March 22-24, 1976.

9. Wilson P.M., Myrphy C.L., Foster W.R. The Effects of sulfonate Molecular Weight and Salt Concentration on the Interfacial Tension of Oil-Brine-Surfactant Systems. Paper SPE5812 presented at SPE-AIME Symposium, Tulsa, Okla, March 22-24, 1976.
10. Abrams A. The Influence of Fluid Viscosity, Interfacial Tension and Flow Velocity on Residual Oil Saturation Left by Waterflood. SPEJ, 1969, vol.15, No.3, 437-447.
- II. Taber J.J. Dynamic and Static Forces Required to Remove a Discontinuous Oil Phase From Porous Media Containing Both Oil and Water. SPEJ, 1969, vol.9, No.1, 3-12.
- I2. Данилов В.Л., Коновалов А.Н., Якуба С.И. Об уравнениях и краевых задачах теории двухфазных фильтрационных течений в пористой среде. - ДАН СССР, 1968, т. 183, № 2, 307-310.
- I3. Коновалов А.Н., Коробицына Ж.Л. К обоснованию метода расщепления по физическим процессам для задач фильтрации. Ин-т теоретической и прикладной механики. Сиб. отд. АН СССР. Препринт № 32, 1978, 21 с.
- I4. Королев А.В., Шалимов Б.В., Швидлер М.И. О некоторых разностных схемах для численного решения задачи Баклея-Леверетта. - Сб. "Численные методы решения задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости". Новосибирск, 1975, 137-154.
- I5. Брагинская Г.С., Ентов В.М. О неизотермическом вытеснении нефти раствором активной примеси. 1978. Препринт № II2 Института проблем механики АН СССР, 60 с.
- I6. Коновалов А.Н. Задачи фильтрации многофазной несжимаемой жидкости. Лекции для студентов НГУ, Новосибирск, 1972, 128 с.