

С. П. Плохотников, О. И. Богомолова, Д. С. Плохотников,
В. А. Богомолов, О. Р. Плохотникова, М. С. Нурсубин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ОТНОСИТЕЛЬНЫМИ ФАЗОВЫМИ ПРОНИЦАЕМОСТЯМИ

Ключевые слова: фильтрация, фазовые проницаемости.

В работе проведен сравнительный анализ двумерных моделей с модифицированными относительными фазовыми проницаемостями и не модифицированными относительными фазовыми проницаемостями, а также трехмерных моделей при неизотермической двухфазной фильтрации нефти в слоистых пластах.

Keywords: filtration, phase permeability.

The comparative analysis of two-dimensional models with the modified relative phase permeability and not modified relative phase permeability has done. Three-dimensional models are also carried out at not isothermal two-phase filtration of oil in stratified beds.

Введение

Для повышения нефтеотдачи месторождений, часто применяют закачку горячей воды. В этом случае гидродинамические расчеты необходимо проводить, учитывая изменение температуры в пласте. Как и в случае с изотермической фильтрацией, применяются осредненные модели [1], в том числе модели с модифицированными относительными фазовыми проницаемостями. Модели принято называть осредненными потому, что в них используются осредненные по толщине характеристики пласта и жидкостей.

В расчетах применяются осредненные по толщине пласта модели, позволяющие понизить размерность исходной задачи на тех или иных участках слоистого месторождения и тем самым значительно упростить численные расчеты.

В некоторых работах [2] при расчетах используются средняя по толщине пласта абсолютная проницаемость и исходные относительные фазовые проницаемости, полученные лабораторным путем. Расчеты по этой модели дают удовлетворительные результаты только при малых значениях коэффициента вариации слоистой неоднородности пласта.

Более перспективным оказался подход, основанный на схеме струй, впервые примененный в условиях двухфазной фильтрации В.Я. Булыгиным [2-3]. В нем используется средняя по толщине пласта абсолютная проницаемость и модифицированные фазовые проницаемости. Эта модель дает удовлетворительные результаты и при больших (вплоть до максимальных) значениях коэффициента вариации слоистой неоднородности..

Однако, в общем случае исходные ОФП, полученные лабораторным способом, являются нелинейными функциями от S и возникает задача о построении осредненных моделей при нелинейных исходных относительных фазовых проницаемостях.

В работе рассматривается двухфазное неизотермическое вытеснение нефти горячей водой в рамках модели Баклея-Левретта [2,3] при площадном заводнении в слоистом пласте.

Использованы пятиточечная и девятиточечная системы заводнения. применяются осредненные по толщине пласта модели [4], позволяющие понизить размерность исходной задачи на тех или иных участках слоистого месторождения и тем самым значительно упростить численные расчеты [5,6].

Цель работы

Цель работы – проверить двумерные модели со средними относительными фазовыми проницаемостями и с модифицированными относительными фазовыми проницаемостями, полученными ранее с учетом струйности течения по пропласткам для экспоненциального закона распределения. Провести сравнительный анализ с помощью вычислительного эксперимента трехмерных и двумерных моделей фильтрации при неизотермической фильтрации. При этом для трехмерных моделей задать слоистую неоднородность, подчиняющуюся экспоненциальному закону распределения.

Описание математических моделей

Пятиточечная система заводнения состоит из нагнетающей скважины в центре квадрата, и 4 добывающих скважин вокруг. Девятиточечная система – из нагнетающей скважины в центре, и 8 добывающих скважин вокруг.

Задача была решена при заданном перепаде давлений между нагнетательной и добывающими скважинами, при этом внешняя граница задавалась непроницаемой. При расчетах использовались сетки из блоков (рис.2, рис.3): $11 \times 11 \times 1$ для двумерного случая (решающей сеткой) и $11 \times 11 \times 10$ (x, y, z) для эталонного трехмерного случая. В расчетах использовалась полностью неявная схема.

В модели были заданы следующие физические параметры:

128 – начальное пластовое давление, атм;

22 – температура пласта, $^{\circ}\text{C}$;

100 – температура закачиваемой воды, $^{\circ}\text{C}$;

55 – забойное давление на добывающей скважине, атм.;

170 - забойное давление на нагнетательной скважине, атм.;

$k_{ro}^0 = 0.5$ – максимальная относительная фазовая

проницаемость воды;

$k_{rw}^0 = 0.7$ – максимальная относительная фазовая

проницаемость нефти;

$S_{or} = 0.2$ – остаточная нефтенасыщенность;

$S_{wc} = 0.3$ – насыщенность связанной воды;

S_w, S_o – водо- и нефтенасыщенности, $S_{wc} \leq S_w \leq 1 - S_{or}$,

$S_o = 1 - S_w$.

Вычислительный эксперимент

Расчеты для пятиточечной и девятиточечной систем проводились для четырех моделей:

Двумерные модели (осредненные):

1. C – модель – задача решалась с линейными исходными относительными фазовыми проницаемостями $k_{rw}(S_w)$, $k_{ro}(S_w)$ вида (1) и средней абсолютной проницаемостью $k^* = 0.5$ дарси в двумерной постановке. Задавался 1 пропласток, высотой $H = 10$ м

$$k_{rw}(S_w) = k_{rw}^0 [(S_w - S_{wc}) / (1 - S_{wc} - S_{or})], \quad (1)$$

$$k_{ro}(S) = k_{ro}^0 [(S_o - S_{or}) / (1 - S_{wc} - S_{or})];$$

2. B – модель – задача решалась в двумерной постановке с модифицированными относительными фазовыми проницаемостями $k_{rw}^m(S_w)$, $k_{ro}^m(S_w)$ вида (2) и $k^* = 0.5$ дарси для экспоненциального закона распределения задания абсолютной проницаемости $k(z)$ исходного слоистого пласта. Задавался 1 пропласток, высотой $H = 10$ м.

$$k_{rw}^m(S_w) = k_{rw}(S_w) \cdot [1 - \ln S_w^*(S_w)], \quad (2)$$

$$k_{ro}^m(S_w) = k_{ro}(S_w) \cdot [1 + S_w^*(S_w) \cdot \ln S_w^*(S_w) / (1 - S_w^*(S_w))]$$

где $S_w^*(S_w) = (S_w - S_{wc}) / (1 - S_{wc} - S_{or})$;

Трехмерные модели (эталонные):

3. A_8 – модели (с изолированными пропластками) – эталонное численное трёхмерное решение задачи для десятислойного пласта с изолированными пропластками (отсутствуют перетоки), распределение абсолютной проницаемости которых подчинялось экспоненциальному закону (из кандидатской). Задавались 10 пропластков, каждый высотой $H_1 = H_2 = H_3 = H_4 \dots H_{10} = 1$ м, изолированных друг от друга непроницаемыми перемышками;

Для экспоненциального закона модифицированные фазовые проницаемости имеют вид:

$$k_w^m(S) = k_{w0}(S_p) \cdot [1 - S_p(S)] \cdot \left[1 + \frac{S_p(S) \cdot \ln S_p(S)}{1 - S_p(S)} \right], \quad (2)$$

$$k_w^m(S_w) = k_{w0}(S_p(S)) \cdot [1 - \ln S_p(S)]$$

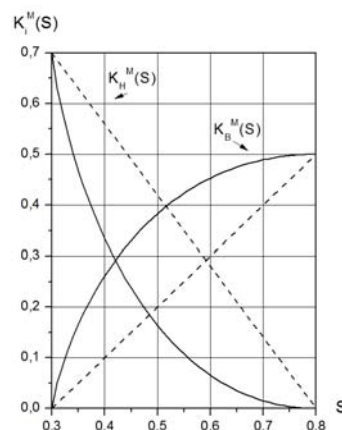


Рис. 1 – Аналитические зависимости для экспоненциального распределения при линейных исходных относительных проницаемостях

4. A_7 – модель (с неизолрованными пропластками) – тоже, что и предыдущая модель, но с неизолрованными пропластками. Задавались 10 пропластков гидродинамически связанные друг с другом. Пропластки располагались относительно друг друга следующим образом: «лучший» (максимальное значение абсолютной проницаемости) рядом с «худшим» (минимальное значение абсолютной проницаемости), «лучший» из оставшихся рядом с «худшим» из оставшихся и т.д. снизу-вверх.

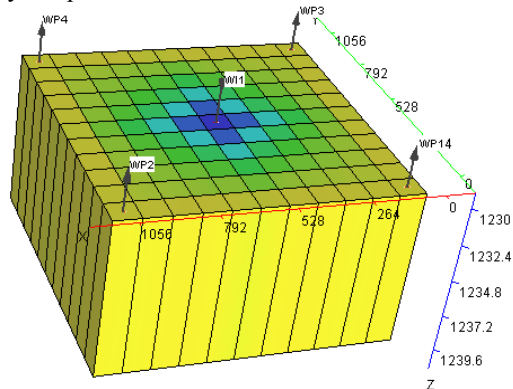


Рис. 2 – Двумерная сетка из 11x11x1

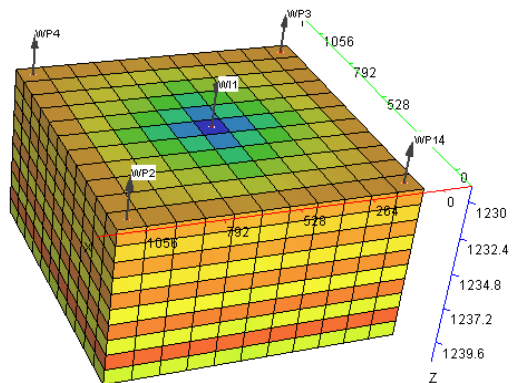


Рис. 3 – Трёхмерная сетка из блоков 11x11x10

Значения заданных в модели физических параметров:
 128 – начальное пластовое давление, *атм*;
 22 – температура пласта, *С*;
 100 – температура закачиваемой воды, *С*;
 55 – забойное давление на добывающей скважине, *атм*.;
 170 – забойное давление на нагнетательной скважине, *атм*.;

$k_{ro}^0 = 0.5$ – максимальная относительная фазовая проницаемость воды;

$k_{rw}^0 = 0.7$ – максимальная относительная фазовая проницаемость нефти;

$k_{rg}^0 = 0.8$ – максимальная относительная фазовая проницаемость нефти газа;

$S_{or} = 0.2$ – остаточная нефтенасыщенность;

$S_{wc} = 0.2$ – насыщенность связанной воды;

$S_{gc} = 0.1$ – насыщенность заземленного газа;

S_w, S_o, S_g – водо-, нефте- и газонасыщенности, $S_w \leq 1 - S_{or} - S_{gc}$.

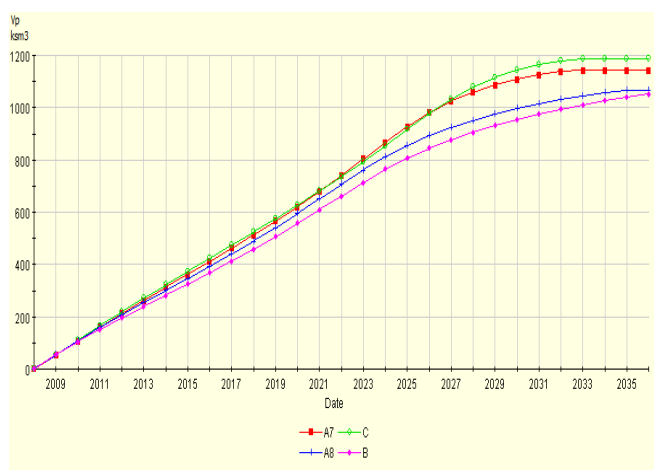


Рис. 4 – Зависимость суммарного объема добытой нефти V_p от времени $Date$ для пятиточечной системы заводнения, и соответственно для решений – A_7, A_8, C, B

Выводы

На рис.4 хорошо видно, что осредненное решение B с модифицированными относительными фазовыми проницаемостями имеет меньшую погрешность относительно эталонного решения A_8 , а

решение C с исходными относительными фазовыми проницаемостями меньшую погрешность относительно эталонного решения A_7 . Такие же результаты получены для девятиточечной системы заводнения, и для других показателей разработки нефти. Решения B и C ограничивают все трехмерные эталонные решения A_i для которых проводились вычисления. Это говорит об обоснованности применения этих двух осредненных моделей при площадном заводнении в слоистых пластах при двухфазной неізотермической фильтрации.

Литература

1. Bogomolov V.A. Mathematical simulation of three-phase filtration in stratified beds with account for the scheme of jets / V.A. Bogomolov, S.P. Plohotnikov, O.R. Bulgakova, D.S. Plohotnikov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – Springer. – 2011. – Vol. 84. – No. 5. – pp. 975-979.
2. Плехотников С.П. Осреднение трехмерной модели двухфазной фильтрации при закачке в пласт полимерно-дисперсных систем / Богомолов В.А., Белова Е.Н., Богомолова О.И. // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – т. 15. – № 1. – с. 63-67.
3. Плехотников С.П. Модифицированные офп в осредненных моделях фильтрации при закачке в пласт полимерных растворов различной концентрации / Богомолов В.А., Белова Е.Н., Богомолова О.И. // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – т. 15. – № 1. – с. 55-58.
4. Плехотников С.П. Осреднение моделей трехфазной фильтрации в неоднородных слоях, подчиняющихся равномерному распределению / Богомолов В.А., Белова Е.Н., Богомолова О.И., Плехотников Д.С., Булгакова О.Р. // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – т. 15. – № 1. – с. 63-67.
5. Климова А.С. Методы гибридной реляционной кластеризации в анализе среднего потребления электроэнергии странами бывшего советского союза / // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2008. – № 5-6. – с. 124-127.
6. Бадертдинова Е.Р. Определение фильтрационно-емкостных параметров пласта и трещины по результатам нестационарных гидродинамических исследований / Салимьянов И.Т. // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2011. – № 3. – с. 62-67.

© С. П. Плехотников – д-р техн. наук, проф. каф. ИПМ КНИТУ, plohotnikov@kstu.ru; О. И. Богомолова – асс. той же кафедры, olga@kfti.knc.ru; Д. С. Плехотников – асс. той же кафедры; В. А. Богомолов – канд. техн. наук, доц. той же кафедры, bogomolov@kfti.knc.ru; О. Р. Плехотникова – асс. той же кафедры; М. С. Нурсубин – канд. техн. наук, доц. той же кафедры.