

СУПЕРЭЛЕМЕНТНАЯ ФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАЗРАБОТКИ КРУПНЫХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

А.Б. Мазо, К.А. Поташев, М.Р. Хамидуллин
Казанский (Приволжский) федеральный университет

KPotashev@mail.ru

Аннотация. Предложена суперэлементная модель разработки крупных нефтяных месторождений, в которой расчет глобальной динамики гладких осредненных полей давления и насыщенности в пласте проводится на крупной сетке, у которой число ячеек сопоставимо с числом скважин. Уравнения для средних полей содержат тензор абсолютной проницаемости и модифицированные функции относительных фазовых проницаемостей. Для их определения на каждом суперэлементе предварительно решаются специальные задачи апскейлинга. Для детализации решения в окрестности скважин применяются вложенные мелкие сетки.

Суперэлементный подход обеспечивает ускорение счета в сотни раз по сравнению с традиционными методами численного моделирования фильтрации на геологических сетках с плановыми размерами ячейки порядка нескольких десятков метров.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование разработки нефтяных месторождений традиционно выполняется с использованием полномасштабных фильтрационных моделей (Roxar Tempest More, Schlumberger Eclipse и др.) на расчетных сетках с размером ячейки порядка нескольких десятков метров по горизонтали и десятков сантиметров по вертикали. Такие модели требуют задания избыточного числа параметров, а для больших месторождений (плановые размеры порядка десятков километров, несколько тысяч скважин) насчитывают миллионы ячеек, что делает практически невозможной адаптацию моделей по промысловым данным и их применение для многовариантных прогнозных расчетов.

Для преодоления указанных проблем при оптимизации системы разработки месторождений предлагается использовать суперэлементный метод моделирования [1–3]. По сравнению с традиционными пакетами суперэлементная модель позволяет ускорить расчет двухфазной фильтрации в пласте в сотни раз за счет использования крупных расчетных ячеек – суперэлементов, число которых сопоставимо с числом скважин на месторождении. Сохранение достаточной точности решения на грубой сетке обеспечивается за счет формулировки задачи относительно гладких средних полей давления и насыщенности, а также выполнения предварительных процедур апскейлинга (ремасштабирования) фильтрационно-емкостных свойств пласта и использования вложенных мелких сеток при необходимости локального уточнения решения.

СЕТКА СУПЕРЭЛЕМЕНТОВ

Для построения сетки суперэлементов в горизонтальной плоскости используются алгоритмы центрированного РЕВ-разбиения, позволяющие строить преимущественно гексагональное сеточное покрытие расчетной области, при котором центры расчетных блоков совпадают с исходной сетью опорных точек. Центрами триангуляции служат действующие вертикальные скважины, а также дополнительные центры, обеспечивающие равномерное покрытие площади месторождения (рис. 1). Неструктурированные расчетные сетки упрощают описание геометрии резервуара и задание граничных условий, а также снижают влияние ориентации сетки на численное решение. Деление пласта на суперэлементы в вертикальном направлении проводится по границам геологических пачек, содержащих несколько проницаемых слоев.

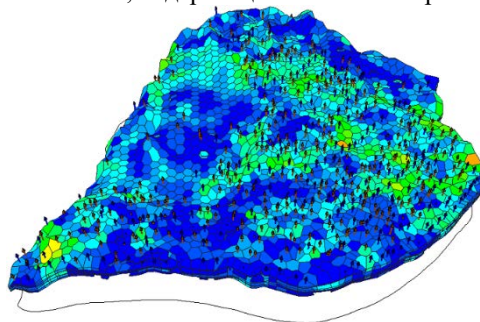


Рис. 1. Пример покрытия месторождения суперэлементной расчетной сеткой

СУПЕРЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ

В основе модели лежат упрощенные уравнения двухфазной фильтрации, записанные без учета капиллярных и гравитационных сил:

$$\begin{aligned} \beta \frac{\partial p}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{U} &= 0, & \mathbf{U} &= -\sigma(s)k(x, y, z)\operatorname{grad} p, & \sigma(s) &= \frac{1}{\mu_w} (k_w(s) + K_\mu k_o(s)), \\ m \frac{\partial s}{\partial t} + \operatorname{div} (f(s)\mathbf{U}) &= 0, & f(s) &= \frac{k_w(s)}{k_w(s) + K_\mu k_o(s)}, & K_\mu &= \frac{\mu_w}{\mu_o}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь t – время, x, y, z – декартовы координаты, p – давление в пластовом флюиде, s – водонасыщенность, m, k – пористость и абсолютная проницаемость пласта, \mathbf{U} – скорость фильтрации флюида, β – упругость, f – доля воды в потоке, μ_w, μ_o – вязкости воды и нефти, k_w, k_o – относительные фазовые проницаемости (ОФП), которые аппроксимируются степенными зависимостями вида

$$k_w = S^a, \quad k_o = (1-S)^b, \quad S = \frac{s-s_*}{s^*-s_*}, \quad (2)$$

где s^*, s_* – границы подвижности фаз; $a, b = 1 \div 4$.

Трехмерные уравнения (1) описывают двухфазную фильтрацию в области D , представляющей месторождение, вскрытое системой нагнетательных и добывающих скважин. Граница Γ области D состоит из внешней границы месторождения (непроницаемые кровля Γ_T и подошва Γ_B , боковая граница Γ_S – внешний контур нефтеносности и линии выклинивания коллектора – с заданными давлением p и насыщенностью S) и внутренних границ коллектора γ_k , образованных поверхностями скважин, на которых задается давление или суммарный расход:

$$(x, y, z) \in \gamma_k : \begin{cases} p = p_k^\gamma, \\ \int_{\gamma_k} U_n d\gamma = Q_k. \end{cases} \quad (3)$$

Аппроксимация уравнений фильтрационной модели (1) – (3) на сетке суперэлементов строится аналогично методу конечных объемов, обеспечивающему консервативность сеточной схемы. В качестве конечных объемов используются суперэлементы. В ходе решения в каждый момент времени t для каждого суперэлемента объемом $|V|$ отыскиваются средние давление и водонасыщенность

$$\bar{p} = \frac{1}{|V|} \int_V p dV, \quad \bar{s} = \frac{\int_V m s dV}{\int_V m dV}.$$

Общая структура осредненных уравнений сохраняется:

$$\begin{aligned} |V| \beta \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + Q &= q, & Q &= \int_{\Gamma_V} U_n d\Gamma \approx \bar{U}_n |\Gamma_V|, & U_n &\approx -\sigma \mathbf{K} \cdot \operatorname{grad} \bar{p} \cdot \mathbf{n}, \\ |V| m \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + Q_w &= F q, & Q_w &= \int_{\Gamma_V} f(s) U_n d\Gamma \approx F \bar{U}_n |\Gamma_V|, & \sigma &= \frac{(h_1 + h_2) \Sigma_1 \Sigma_2}{h_1 \Sigma_2 + h_2 \Sigma_1}. \end{aligned}$$

Здесь Γ_V – совокупность граней суперэлемента V ; \mathbf{n} – нормаль к грани; q – расход двухфазного флюида по находящимся в суперэлементе скважинам; \mathbf{K} – тензор абсолютной проницаемости, описывающий внутреннюю геологическую неоднородность суперэлемента и вычисляемый при апскейлинге трехмерного поля абсолютной проницаемости; индексами 1 и 2 обозначены суперэлементы, разделенные гранью; $h_{1,2}$ – расстояние от грани до центра соответствующего суперэлемента; функции $\Sigma_{1,2} = \Sigma(\bar{s}_{1,2})$, $F(\bar{s})$ являются аналогами функций $\sigma(s)$ и $f(s)$ и подлежат определению в результате апскейлинга ОФП [4].

Построение низкодиссипативной сеточной аппроксимации гиперболического уравнения переноса насыщенности обеспечивается методом TVD в его алгебраической форме в сочетании с оригинальным подходом к коррекции движения фронта насыщенности.

Для глобальной адаптации модели оказывается достаточным использование грубой суперэлементной сетки. Высокая точность численного решения вблизи геологических и технологических особенностей расчетной области (тектонические разломы, линзы, палеоруслы, вертикальные, горизонтальные скважины, трещины одиночного и многозонного гидроразрыва пласта) достигается за счет решения вспомогательных задач на вложенных мелких сетках (рис. 2) [5, 6].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 3 представлен пример результатов воспроизведения истории разработки нефтяного пласта методом суперэлементов: динамика заводнения пласта в виде карт текущей нефтенасыщенности и графики интегральных показателей разработки пласта – накопленной и текущей добычи нефти.

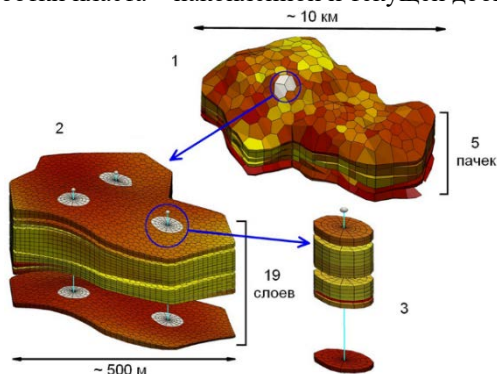


Рис. 2. Схема построения локального измельчения (2) сетки суперэлементов (1) в области, требующей уточнения расчетов в окрестности скважин (3)

Участок месторождения насчитывал 623 скважины, двумерное разбиение содержало 1 873 ячейки со средним плановым размером 500 м. По четырем пачкам было выделено 7 573 суперэлемента (с разделением вдоль поверхности водонефтяного контакта). Время воспроизведения 55 лет истории разработки месторождения составило 80 секунд при конфигурации компьютера AMD Athlon™ 64 X2, DualCore, 1.79 ГГц, 1.87 ГБ ОЗУ.

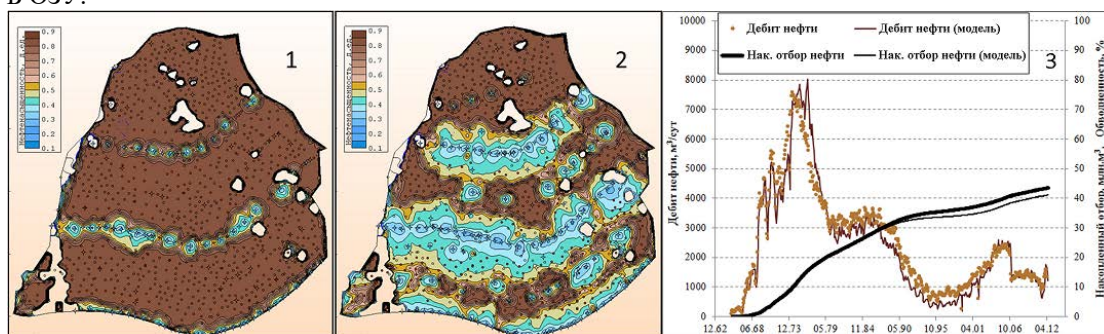


Рис. 3. Расчетное поле нефтенасыщенности через 10 (1) и 20 (2) лет разработки. Справа (3) - сопоставление расчетных и фактических данных по отбору нефти

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Апробация суперэлементной модели на реальных нефтяных месторождениях и сравнение результатов численного моделирования с результатами, полученными с применением традиционных моделей на мелких сетках, подтверждают широкие возможности и перспективы применения модели для оперативных расчетов. Модель реализована в виде программного комплекса по сопровождению и мониторингу разработки нефтяных месторождений, с помощью которого были построены модели разработки ряда месторождений РФ и Казахстана.

В суперэлементную модель заложены возможности описания произвольно ориентированных стволов скважин, гидравлического разрыва пласта, тектонических разломов, выделенных геологических тел. Для этого в каждом случае применяются вспомогательные мелкие сетки и решаются соответствующие математические задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан (гранты №№ 13-01-97044, 13-01-97031), а также British Petroleum Exploration (тема № 063100027).

Литература

1. Мазо А.Б., Булыгин Д.В. // Нефть. Газ. Новации. 2011. № 11. С. 6-8.
2. Мазо А.Б., Поташев К.А., Калинин Е.И., Булыгин Д.В. // Математическое моделирование. 2013. Т. 25 (8). С. 51-64.
3. Булыгин Д.В., Мазо А.Б., Поташев К.А., Калинин Е.И. // Георесурсы. 2013. Т. 53 (3). С. 31-35.
4. Поташев К.А. // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2014. Т. 156 (2), С. 120-134.
5. Мазо А.Б., Поташев К.А., Булыгин Д.В. // Нефть. Газ. Новации. 2012. № 4. С. 48-50.
6. Мазо А.Б., Калинин Е.И., Поташев К.А., Булыгин Д.В. // Нефть. Газ. Новации. 2013. № 1. С. 45-51.