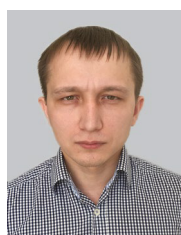


ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОНЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В РАДИАЛЬНОМ ПЛАСТЕ С НАКЛОННОЙ СКВАЖИНОЙ

Т.Р. Шарипов, Д.В. Ефимов, Э.Р. Нугуманов
(ООО «БашНИПИнефть»)



Т.Р. Шарипов
Начальник отдела
SharipovTR@bashneft.ru



Д.В. Ефимов
Начальник Управления
EfimovDV@bashneft.ru



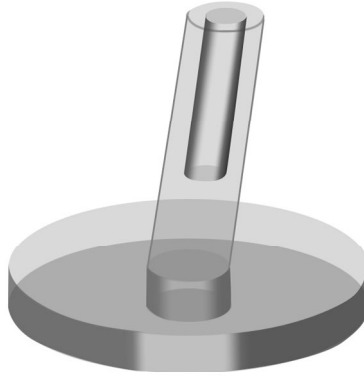
Э.Р. Нугуманов
Главный специалист
NugumanovER@bashneft.ru

В настоящее время основной фонд вертикальных и наклонно направленных нефтяных и газовых скважин принято описывать в рамках узлового анализа с использованием аналитических моделей притока из пласта и механистических методик расчета установившихся многофазных режимов потока в стволе скважины [1]. Использование соответствующего программного обеспечения (Pipesim компании Schlumberger и его аналоги) позволяет оценить потенциал скважин и оптимизировать их конструкцию, в том числе с учетом ограничений поверхностной сети сбора. К недостаткам подобного подхода следует отнести следующие:

- корреляционный характер расчетных методик обладает невысокой точностью;
- невозможно моделирование переходных процессов, таких как «кризисное течение» («casing heading»), обусловленных взаимодействием затрубного пространства и НКТ;
- необходим двусторонний обмен данными с гидродинамическим симулятором для учета переменных граничных условий на забое.

Альтернативным подходом является прямое численное решение дифференциальных уравнений законов сохранения Эйлера для интегрированной системы пласт-скважина в стационарной и нестационарной постановке [2, 3]. Применительно к многофазной среде это позволит определить распределение давлений, скоростей и насыщенных флюидов в процессе их движения в единой системе пласт-скважина. В 2012 г. авторами совместно с СПбГУ была выполнена научно-исследовательская работа (Савичев В.И., ООО «БашНИПИнефть», 2012 г.) по подбору оптимального термобарического режима работы скважины в условиях высокого газового фактора при следующих принятых допущениях:

- рассматривается одиночная скважина, вскрывающая плоскорадиальный пласт заданной высоты H и радиуса контура питания R_c (рисунок);
- скважина может быть одноствольной и многоствольной (НКТ, затрубное пространство, обсадная колонна);
- течение в скважине предполагается осесимметричным, в пласте – радиальным, без учета вертикальной неоднородности;
- используется стандартная модель нелетучей нефти (Black-Oil) для различных комбинаций фаз нефти (o), воды (w) и газа (g) (вода и нефть не смешиваются и не обмениваются массами; газ растворим в нефти и нерастворим в воде);
- учитывается эффект проскальзывания газовой фазы относительно жидких фаз (нефть и вода), а также нефти относительно воды в пузырьковом и пробковом режимах течения;
- течение предполагается изотермическим (уравнение сохранения энергии не учитывается).



Многоствольная наклонная скважина и радиальный пласт

В каждом стволе скважины и в радиальном пласте (см. рисунок) записываются уравнения неразрывности в рамках модели Black-Oil для недеформируемой пористой среды [4]:

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \frac{S_w}{B_w} \\ \frac{S_o}{B_o} \\ \frac{S_g}{B_g} + R_s \frac{S_o}{B_o} \end{pmatrix} + \operatorname{div} \begin{pmatrix} \frac{u_w}{B_w} \\ \frac{u_o}{B_o} \\ \frac{u_g}{B_g} + R_s \frac{u_o}{B_o} \end{pmatrix} = 0 \quad (1)$$

и уравнения баланса насыщенностей:

$$S_o + S_w + S_g = 1 \quad (2)$$

где $t = (0, T]$ – время (T – общее расчетное время), ϕ – пористость, R_s – газосодержание, S_r , u_r , B_l – насыщенность, скорость и объемный коэффициент фазы $l = o, w, g$ соответственно.

В радиальной системе пласта $\text{div } a = \frac{1}{r} \frac{\partial (ra)}{\partial r}$ для любого скаляра a , где $r \in [R_w, R_c]$ – координата вдоль радиуса пласта; R_w – внешний радиус скважины, являющейся внутренней границей для пласта.

Скорости фильтрации определяются законом Дарси без учета гравитационных сил:

$$u_l = -M_l \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (3)$$

где $M_l = \frac{k k_{rl}}{\mu_l}$ – мобильность фазы l ; k – абсолютная проницаемость; k_{rl} – относительная фазовая проницаемость фазы l ; p – абсолютное давление.

В системе уравнений (1)-(3) набор переменных $X = [p(r, t), S_w(r, t), S_g(r, t)]$ выбран в качестве независимого. При расчете зависимых физико-химических свойств игнорируются капиллярные эффекты, тем самым все используемые в расчетах свойства $B_l(p)$, $R_s(p)$, $p_l(p)$, $\mu_l(p)$ ($l = o, w, g$) зависят только от давления p всей смеси и могут задаваться как аналитически, так и табличными данными (в реализованном расчетном модуле это текстовый файл в формате гидродинамического симулятора Eclipse). Аналогично задаются относительные фазовые проницаемости $k_{rl}(S_w, S_g)$ при расчете мобильных M_l в (3).

В каждом стволе скважины в системе (1) пористость всегда равна единице ($\phi \equiv 1$) и $\text{div} = \partial/\partial x$, где $x \in [0, L]$; L – длина ствола скважины. Наличие газожидкостного потока в стволе скважины характеризуется эффектом проскальзывания газовой фазы относительно жидкости согласно модели Drift-Flux [5] в пузырьковом и пробковом режимах течения:

$$u_g = C_0 u_m + u_d, \quad (4)$$

где C_0 – профильный параметр, получаемый из профилей скорости и газонасыщенности; u_d – скорость проскальзывания газа; $u_m = S_w u_w + S_o u_o + S_g u_g$ – средняя скорость смеси.

Средняя скорость смеси u_m в стволе скважины также является независимой (расширяет набор неизвестных X), а система (1), (2) дополняется уравнением момента импульса для всей смеси:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_o^{SC} \left(\frac{u_{So}}{B_o} \right) + \rho_w^{SC} \left(\frac{u_{Sw}}{B_w} \right) + \rho_g^{SC} \left(\frac{u_{Sg}}{B_g} + R_s \frac{u_{So}}{B_o} \right) \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = \\ = - \sum_{l=o, w, g} S_l \rho_l \gamma \sin(\theta) - \lambda \frac{\rho_m u_m |u_m|}{D}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $u_{sl} = S_l u_l$ – приведенная скорость фазы l ; ρ_l^{SC} – плотность фазы l в поверхностных условиях; γ – ускорение свободного падения; $\theta = \theta(l)$ – переменный угол наклона ствола скважины от горизонтали; D – внутренний диаметр ствола скважины; λ – коэффициент гидравлического сопротивления, рассчитываемый из уравнения Коулбрука [6] с учетом задаваемой шероховатости трубы; $\rho_m = \sum_{l=o,w,g} \alpha_l \rho_l$ – скорость смеси; $\rho_o = (\rho_o^{SC} + R_s \rho_g^{SC}) / B_o$, $\rho_g = \rho_g^{SC} / B_g$ – плотности фаз в пластовых условиях.

Система (1)-(3) для пласта и (1)-(5) для каждого ствола скважины замыкается начально-краевыми условиями для вектора неизвестных X , соответствующими конкретной задаче: гидростатическое равновесие, постоянные расходы или отсутствие потока на устье скважины, постоянное давление или «непереток» на контуре питания пласта, приток на забой по IPR при отсутствии численного пласта.

Кольцевая структура затрубного пространства пересчитывается на эквивалентный радиус.

Системы дифференциальных уравнений аппроксимируются методом контрольных объемов на разнесенной разностной сетке с давлением и насыщенностями в центре и скоростями на грани контрольного объема. В пласте делается замена переменных $s = \ln\left(\frac{r}{R_w}\right)$ для желательного экспоненциального

измельчения сетки вблизи скважины при равномерном шаге по s . Отметим также, что набор неизвестных не является постоянным, поскольку возможно переключение переменных с газонасыщенности S_g на газосодержание R_s при отсутствии свободного газа и обратно.

Приток в ячейку обсадной колонны из ближайшей ячейки пласта определяется по разностному аналогу формулы Дюпюи на грани контрольного объема:

$$Q_l = S_l \frac{2\pi k h}{\mu_l} \frac{\partial p}{\partial r},$$

а притоки в ячейку НКТ и затрубного пространства из соседней к ним ячейки обсадной колонны задаются по определению скорости фильтрации:

$$Q_l = S_l \mu F,$$

где высота h и площадь F представляют собой варьируемые, исходя из размеров перфорационных отверстий и учета сепарации газа соответственно, параметры.

Полученная полностью неявная нелинейная разностная схема разрешалась на каждом временном шаге методом Бroyдена, сходимость которого показала лучшие результаты по сравнению с базовым методом Ньютона-Рафсона.

Возможности разработанного на C++ программного модуля «CoFlow» позволяют рассчитывать широкий спектр технологий вывода скважин на режим (естественное фонтанирование, газодепрессионное освоение, сваби́рование) в условиях пузырькового и пробкового режимов потока. С помощью «CoFlow» были проведены важные практические расчеты по оценке потенциала фонтанирования ряда разведочных скважин месторождений им. Р. Требса и А. Титова, а также смоделированы неустойчивые режимы работы скважин, такие как «heading».

Список литературы

1. Бикбулатов С.М., Пашали А.А. Анализ и выбор методов расчета градиента давления в стволе скважины // Нефтегазовое дело. – 2005. – №2. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Bikbulatov/Bikbulatov_1.pdf
2. Hu B., Sagen J., Chupin G., Haugset T., Ek A., Sommersel T., Xu Z.G., Mantecon J.C. Integrated Wellbore/Reservoir Dynamic Simulation // SPE 109162. – 2007.
3. W.L. Sturm, O. van Wolfswinkel. Dynamic Reservoir Well Interaction // SPE 90108. – 2004.
4. Каневская Р.Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений. – М.: Ижевск, 2002. – 140 с.
5. Shi H., Holmes J.A., Durlofsky L.J., Aziz K., Diaz L.R., Alkaya B., Oddie G. Drift-Flux Modeling of Multiphase in Wellbores // SPE 84228. – 2003.
6. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.