УДК 532.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ПОДЗЕМНОМ ПЛАСТЕ

П.К. Волков

Югорский госуниверситет, Ханты-Мансийск

volkovpk@mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Движение жидкости в подземном пласте происходит под большим давлением. Определение характерных масштабов длины и скорости с учетом давления позволяет получить минимальный набор безразмерных параметров задачи и получить прогноз на изменение динамики жидкости в связи с вариациями величины давления. Расчеты показывают, что движение воды под большим давлением можно моделировать движением пара при нормальных условиях. Моделирование течений жидкости проводится на основе уравнений Обербека – Буссинеска с введенной слабой сжимаемостью вдоль траекторий движения. Наличие такой сжимаемости позволяет дать физически ясные объяснения различным переходным процессам. Визуализация поля дивергенции скорости (областей повышенной и пониженной плотности) завершает описание полной картины течения. Проведены модельные расчеты движения жидкости в пласте при наличии нагнетательных и добывающих скважин. Представлены эффекты сжимаемости, способные привести к снижению расходных характеристик в каналах и переходу к нестационарным автоколебательным режимам.

Ключевые слова: жидкость, подземный пласт, теория подобия, сжимаемая среда, переходные процессы, система Обербека – Буссинеска.

Введение

Получение достоверных знаний о движении жидкостей в каналах с большим давлением представляет актуальную задачу в связи с оптимизацией затрат на извлечение нефти из подземных пластов. Если учесть, что нефтеносные пласты в настоящее время сосредоточены на глубине 2–3 км и более, то давление в пласте более 200–300 атм. Таким образом, для получения адекватных данных необходимо помещать лабораторную установку в защитный бокс и, «бомбой». По этой причине исследования проводятся только на малых образцах, а потому получаемые данные имеют узкую сферу применимости. Для расширения области применимости необходимо привлекать теорию подобия.

Прогноз конвективных процессов на основе теории подобия

Пусть жидкость с плотностью ρ, вязкостью ν и поверхностным натяжением σ находится в поле силы тяжести, характеризуемом величиной ускорения свободного падения g. Таким образом, имеем 7 физических констант, определяющих движение жидкости через канал: ρ, ν, σ, g, $p_п$, Δp, h.

Из теории подобия следует, что из 7 констант можно построить 4 независимых безразмерных параметра [1]. Поскольку величина давления в пласте рп большая, и нас интересует характер изменений в движении жидкости по сравнению с нормальными условиями, выберем масштабы длины и скорости с учетом его значения: $L = p_п/\rho g$, $U = (p_п/\rho)^{1/2}$. В результате числа Фруда и Эйлера равны единице, числа Рейнольдса и Вебера имеют вид [1]: $\mathrm{Re} = (p_п/\rho)^{3/2}/\nu g$, $\mathrm{We} = p_п^2/\rho g\sigma$; два параметра, характеризующих геометрию: $\Delta = \Delta p/p_п$, $H = \rho g h/p_п$. Изменение давления от атмосферного до величины $p_п$ приводит к усилению инерциальных свойств жидкости (уменьшению влияния внутреннего трения) и существенному ослаблению влияния капиллярных сил. Последний вывод, кстати, основывается в [2] на данных результатов геологических исследований, но принадлежит к категории подлежащих проверке и обоснованию.

Для подобия двух физических процессов необходимо и достаточно, чтобы в этих процессах численные значения всех безразмерных параметров были одинаковыми. В данном случае имеем для процессов, которые обозначим индексами «п» и «з»: $\mathrm{Re}_п = \mathrm{Re}_з$, $\mathrm{We}_п = \mathrm{We}_з$, $\Delta_п = \Delta_з$, $H_п = H_з$. В результате имеем следующие зависимости между физическими параметрами состояний сред в пласте и на поверхности и геометрическими масштабами:

$$(p_п/\rho_п)^{3/2}/\nu_п g_п = (p_з/\rho_з)^{3/2}/\nu_з g_з,$$
$$p_п^2/\rho_п g_п \sigma_п = p_з^2/\rho_з g_п \sigma_з,$$
$$\Delta p_п/p_п = \Delta p_з/p_з, \qquad \rho_п g_п h_п/p_п = \rho_з g_з h_з/p_з.$$

Система 4 алгебраических уравнений относительно 7 параметров с индексом «з» является нелинейной и в общем случае малопригодной практически. Для точного учета порового пространства пласта необходимо иметь одинаковые геометрические размеры образцов. Это дает соотношение $h_п = h_з$. Поскольку пласт находится на глубине 2–3 км, величина ускорения свободного падения изменяется на доли процента, то есть можем принять $g_п = g_з$. Таким образом, из четвертого уравнения получаем соотношение $\rho_з/p_з = \rho_п/p_п$. При заданных значениях давления и плотности жидкости в пласте можно определить плотность модельной среды на поверхности $\rho_з = p_з\rho_п/p_п$, которая будет на два порядка (в данном случае) меньше, чем плотность жидкости в пласте. Из второго уравнения получим $\sigma_з = \sigma_п p_з/p_п$, т.е. для обычных жидкостей в пласте поверхностное натяжение модельной среды на поверхности должно быть меньше единицы. Это означает, что капиллярными свойствами можно пренебречь. Из оставшихся уравнений следует, что $\nu_з\rho_з = \nu_п\rho_п p_з/p_п$, то есть динамическая вязкость среды на поверхности на два порядка меньше, чем у жидкости в пласте. Именно такое соотношение по порядку величин будет у воздуха и воды [3].

Моделирование пласта и добывающих и нагнетающих скважин

В качестве модели подземного пласта с водой рассмотрим прямоугольник с отношением сторон 1.5:0.5. Горизонтальные границы непроницаемы, здесь жидкость прилипает и соответственно скорость равна нулю. Вертикальные границы – проницаемые, на них задано давление $p_л$, $p_п$, так что расход через них будет определяться в ходе решения. Добывающие и нагнетающие скважины моделируются одинаковыми каналами с отношением длины к ширине 0.55:0.01, проникающими через верхнюю стенку. На верхних торцах каналов задается давление p_1, p_2, p_3, так что в зависимости от соотношения величин давлений будем иметь либо нагнетающую, либо добывающую скважину. Величину перепадов давлений на каналах зададим в соответствии с условиями подземного пласта. Так, отношение разности давлений в пласте и на поверхности к длине скважины примем за 1000. Таким образом, задание значений $p_л = p_п = 1000$, $p_1 = 0$, $p_2 = 2000$, $p_3 = 0$ моделирует пласт с двумя добывающими скважинами и одной (посредине) нагнетающей. Перепады давлений подобраны так, чтобы расходы через каналы были одинаковыми и можно было проследить влияние каждой на пласт, а также их взаимодействие. Течение воды в рассматриваемой области с заданными величинами давления на участках протекания определялось решением регуляризованных уравнений Навье – Стокса [4]. Расчетная сетка нерегулярная, более мелкая в каналах, где поперек порядка 25–28 узлов, являющихся вершинами треугольников; сетка в пласте примерно в 4 раза более редкая, в окрестности конца канала происходит двукратное сгущение от редкой к частой.

Данные расчетов показывают, что воздействие нагнетательной скважины существенно сильнее (даже при одинаковых расходах через каналы), рис. 1.

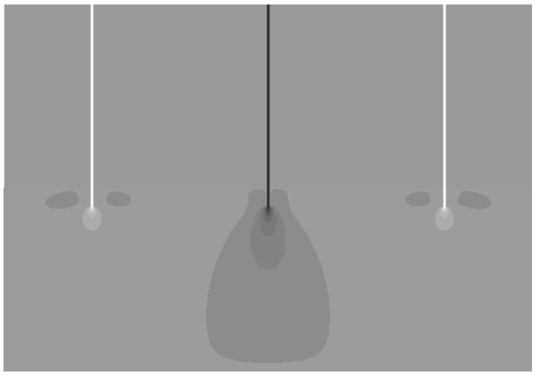

Рис. 1. Вертикальная компонента скорости при перепаде 1000

Специфика нестационарных струйных течений в областях сложной геометрии [5] может приводить к различным типам течений с замкнутым кругооборотом через добывающие и нагнетательные каналы, рис. 2. Распределение давления по длине трубы всюду линейно по вертикали.

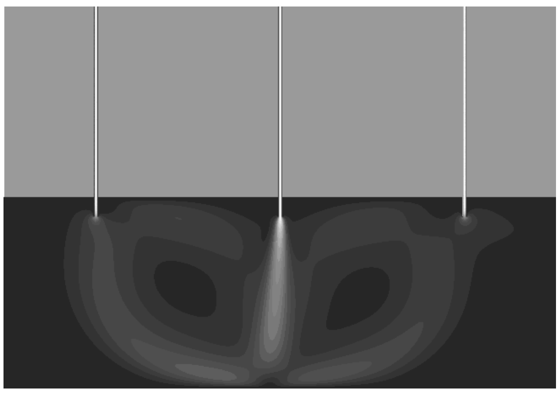

Рис. 2. Модуль вектора скорости при перепаде 10000

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке из средств бюджета Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (грант губернатора НУ 06.4/06-ЮГУ-234).

Список литературы

1. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 1973. 536 с.
2. Маскет М. Физические основы технологии добычи нефти. М.-Ижевск, 2004. 608 с.
3. Волков П.К. // Докл. РАН. 2007. Т. 417, №3. С. 332–336.
4. Ананьев П.А., Волков П.К. // ЖВМиМФ. 2005. Т. 45, №7. С. 1289–1303.
5. Ананьев П.А., Волков П.К. // Изв. РАН. МЖГ. 2006. №6. С. 18–28.

THE MOTION OF A FLUID IN A RESERVOIR

P.K. Volkov

A fluids moves in a reservoir is under high pressure. Defining the characteristic length and velocity scales in the light of the pressure allows us to obtain a minimum set of dimensionless parameters of the problem and forecast the changing dynamics of fluids in connection with variations of the pressure. Calculations show that the movement of water under high pressure can be simulated by motion of steam under normal conditions. Simulation of fluid flow is based on Oberbeck – Boussinesq equations with assumed low compressibility along the motion trajectories. The presence of weak compressibility along the trajectories allows us to give a physically clear explanation of the various transition processes. Visualization of divergence of the velocity field (areas of high and low density) completes a full description of the flow pattern. Model calculations of the motion of fluid in the reservoir in the presence of injection and production wells were done. Compressibility effects that could lead to a decrease in flow rate characteristics of the channels and the transition to non-stationary self-oscillating mode are presented.

Keywords: fluid, reservoir, similarity theory, low compressibility, transient flows, Oberbeck – Boussinesq model.