

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБРАЗОВАНИЯ НИЗКОПРОНИЦАЕМОЙ ЗОНЫ ВБЛИЗИ ЗАБОЯ СКВАЖИНЫ

ФЕДОРОВ К.М.

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

kfedorov@utmn.ru

МУСАКАЕВ Н.Г.

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им.С.А.Христиановича СО РАН, Тюмень, Россия,

timms@tmn.ru

ТЕРЕНТЬЕВ В.Л.

ООО НТЦ «Ойлтим», Томск, Россия

TerentyevVL@siamoil.ru

ANALYTICAL SOLUTION OF PROBLEM OF FORMATION LOW-PERMEABILITY ZONE NEAR WELL BOTTOM

FEDOROV K.M.

Tyumen State University, Tyumen, Russia

kfedorov@utmn.ru

MUSAKAEV N.G.

Tyumen Branch of Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Tyumen, Russia

timms@tmn.ru

TERENTIEV V.L.

«NTTs OILTEAM» ltd., Tomsk, Russia

TerentyevVL@siamoil.ru

Построена математическая модель процессов, происходящих при закачке в пористую среду воды с отличными от пластовой воды химическими свойствами. На основе результатов аналитического решения данной модели показано, что наиболее вероятной причиной формирования аномального значения скин-фактора, полученного в результате анализа кривой падения давления, представляется образование низкопроницаемой зоны вследствие выпадения твердого осадка в зоне вблизи скважины, приводящее к существенному снижению проницаемости в этой зоне.

Зачастую закачка воды с отличными от пластовой воды физико-химическими свойствами может приводить к существенному ухудшению коллекторских свойств участка пласта вблизи скважины. Понимание процессов, происходящих в пласте при смешении вод с различным химическим составом, является актуальной практической задачей.

Рассмотрим задачу о закачке в пористый пласт воды в рамках многокомпонентной изотермической фильтрации однофазной несжимаемой жидкости [1,2]. Вкладом диффузионных процессов при моделировании закачки воды в пористый пласт будем пренебрегать, т.к. длительность данных процессов значительно больше, чем время химических реакций и формирования осадков в призабойной зоне. Положим, что задача является осесимметричной, т.е. распределение реагентов, скорости потока в призабойной зоне зависят только от радиуса. Здесь следует отметить, что из-за неоднородности призабойной зоны скважины течение может отклоняться от радиального, но и в этом случае интегральные распределения реагентов и баланс

масс в результате химической реакции остаются прежними, т.е. прогнозируются упрощенным осесимметричным подходом в достаточной мере точно.

Типичную химическую реакцию, которая может происходить в пористой среде при смешении вод с различным химическим составом, можно записать следующим образом:



Будем считать, что остаточная или «реликтовая» вода в пористой среде зацементирована за счет капиллярных сил и не вытесняется закачиваемой водой. Эта вода со своим минеральным составом остается неподвижной, смешиваясь, таким образом, с закачиваемой водой.

В рамках сделанных допущений запишем уравнения неразрывности для каждого компонента приведенной реакции:

$$\rho_w S_{wr} \frac{\partial c_1 m}{\partial t} = J, \quad (1)$$

$$\rho_w (1 - S_{wr}) \frac{\partial c_2 m}{\partial t} + \rho_w (1 - S_{wr}) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rmv c_2) = \chi_2 J,$$

$$\rho_w S_{wr} \frac{\partial c_3 m}{\partial t} = -\chi_3 J,$$

$$\rho_w (1 - S_{wr}) \frac{\partial \tilde{c}_4 m}{\partial t} + \rho_w (1 - S_{wr}) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rmv \tilde{c}_4) = -\tilde{\chi}_4 J,$$

$$\tilde{c}_4 = c_4 + c_5, \quad \tilde{\chi}_4 = \chi_4 + \chi_5,$$

где $\chi_i = M_i / M_1$ – стехиометрические коэффициенты ($i = 2, 3, 4, 5$), M_i – суммарный молекулярный вес i -го вещества, участвующего в реакции; c_i – концентрация i -го реагента в потоке и пористой среде; $\rho_w = \text{const}$ – истинная плотность флюида; m – пористость породы; J – интенсивность массообмена за счет химической реакции, $S_{wr} = \text{const}$ – остаточная водонасыщенность; v – скорость жидкости; t – время; r – радиальная координата. Здесь и далее нижний индекс i относится к номеру компонента: 1 – катионы кальция, содержащиеся в пластовой воде; 2 – анионы угольной кислоты в закачиваемой воде; 3 – нерастворимый в воде кальцит; 4 – вода; 5 – углекислый газ, растворенный при пластовой температуре и давлении в водной фазе. В системе уравнений (1) учтено, что в пластовых условиях выделяющийся углекислый газ будет полностью растворен в воде.

Начальные и граничные условия в задаче о закачке воды в скважину имеют вид:

$$t = 0, \quad r > r_b : c_1 = c_{10}, \quad \tilde{c}_4 = 1, \quad m = m_0,$$

$$t > 0, \quad r = r_b : c_2 = c_{20}, \quad c_1 = 0,$$

r_b – радиус скважины.

В рассматриваемой задаче концентрации продуктов реакции и кислоты невелики. В этой связи изменение истинной плотности раствора незначительно и можно использовать закон Амага, согласно которому не только масса, но и объем системы в результате реакции не меняется [3]. В этом случае суммарный закон сохранения массы всего раствора приводит к соотношению:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rmv) = 0.$$

Тогда при заданном объемном расходе закачиваемого в пласт флюида Q_0 получим:

$$rmv = \frac{Q_0}{2\pi h}, \quad (2)$$

где h – мощность продуктивного пласта.

Из первого уравнения системы (1) выразим J и подставим в другие уравнения этой системы, учитывая при этом соотношение (2),

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ (1 - S_{wr}) m c_2 - \chi_2 S_{wr} m c_1 \} + (1 - S_{wr}) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{Q_0}{2\pi h} c_2 \right) = 0, \quad (3)$$

$$S_{wr} \frac{\partial}{\partial t} \{ m (c_3 + \chi_1 c_1) \} = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \{(1 - S_{wr})m\tilde{c}_4 + \tilde{\chi}_4 S_{wr} m c_1\} + (1 - S_{wr}) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{Q_0}{2\pi h} \tilde{c}_4 \right) = 0.$$

Положим, что изменение пористости пласта $\Delta m = (m - m_0)$ является малой величиной. Пренебрегая величинами порядка Δm^2 , $c_i \Delta m$ и выше, проведем линеаризацию системы (3):

$$m_0 \frac{\partial}{\partial t} \{(1 - S_{wr})c_2 - \chi_2 S_{wr} c_1\} + (1 - S_{wr}) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{Q_0}{2\pi h} c_2 \right) = 0, \quad (4)$$

$$m_0 S_{wr} \frac{\partial}{\partial t} (c_3 + \chi_1 c_1) = 0,$$

$$m_0 \frac{\partial}{\partial t} \{(1 - S_{wr})\tilde{c}_4 + \tilde{\chi}_4 S_{wr} c_1\} + (1 - S_{wr}) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{Q_0}{2\pi h} \tilde{c}_4 \right) = 0.$$

Для дальнейшей работы с системой уравнений введем безразмерные координаты:

$$X = \frac{\pi h m_0 (r^2 - r_b^2)}{V_0}, \quad T = \frac{Q_0 t}{V_0},$$

где V_0 – объем закачанной воды.

Выразив систему (4) в новых координатах, получим:

$$\frac{\partial}{\partial T} \{(1 - S_{wr})c_2 - \chi_2 S_{wr} c_1\} + \frac{\partial}{\partial X} \{(1 - S_{wr})c_2\} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial T} \{S_{wr} (c_3 + \chi_3 c_1)\} = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial T} \{(1 - S_{wr})\tilde{c}_4 + \tilde{\chi}_4 S_{wr} c_1\} + \frac{\partial}{\partial X} \{(1 - S_{wr})\tilde{c}_4\} = 0.$$

Из суммарного уравнения сохранения массы всего потока следует, что скорость движения жидкости v может изменяться лишь в зоне химической реакции, вне этой зоны $\partial v / \partial X = 0$ [2]. Решение гиперболической системы уравнений (5) в этом случае представляется в виде трех зон: 1) зона вблизи скважины, где химическая реакция уже завершилась ($0 < X < X_f$); 2) зона, в которую вытеснены продукты реакции ($X_f < X < X_v$); 3) зона пласта, еще не затронутая реакцией ($X > X_v$).

Условия баланса масс на разрыве, отвечающем фронту химической реакции (при $X = X_f$), имеют вид

$$D[(1 - S_{wr})c_2 - \chi_2 S_{wr} c_1] = (1 - S_{wr})[c_2], \quad (6)$$

$$D[c_3 + \chi_3 c_1] = 0,$$

$$D[(1 - S_{wr})\tilde{c}_4 + \tilde{\chi}_4 S_{wr} c_1] = (1 - S_{wr})[\tilde{c}_4],$$

где D – скорость движения этого разрыва. Квадратными скобками обозначается разность величины до и после разрыва.

Из (6) с учетом начальных и граничных условий находим неизвестные параметры:

$$D = \left(1 + \frac{\chi_2 S_{wr} c_{10}}{(1 - S_{wr})c_{20}} \right)^{-1}, \quad c_3 = \chi_3 c_{10}, \quad \tilde{c}_4 = \frac{\tilde{\chi}_4 S_{wr} c_{10} D}{(1 - S_{wr})(1 - D)}.$$

На рис.1 представлено схематичное распределение зон и положение точек X_f и X_v в некоторый момент времени T^* .

Применим результаты решения системы (6) для анализа проведенного исследования разведочной скважины Сузунского месторождения на водонасыщенном пласте.

Из-за технологических сложностей опробование пласта не было выполнено. На скважине была проведена регистрация кривой восстановления давления (КВД), но в связи с малыми и неустойчивыми объемами отбора жидкости интерпретация КВД оказалась существенным образом затрудненной. По результатам интерпретации КВД проницаемость оценивалась весьма значительной величиной, равной 1745 мД. После этого было принято решение о проведении закачки воды в скважину и снятия кривой падения давления (КПД) после остановки закачки. Объем закачанной воды составил 1000 м³, закачка осуществлялась в течение 50 часов, запись

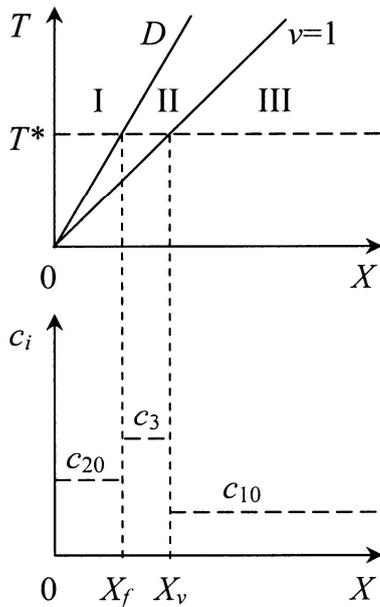


Рис.1

$Q_0 = 480 \text{ м}^3/\text{сут}$; $m_0 = 0,2$; $S_{wr} = 0,26$; $c_{10} = 0,06$; $c_{20} = 0,09$; $k_0 = 1228 \text{ мД}$.

Проницаемость пласта обычно задается некоторой степенной функцией от пористости m среды

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{m}{m_0} \right)^n, \quad m = m_0 - S_{wr} c_3.$$

Чаще всего для показателя степени n используют значение, равное 3 (формула Козени-Кармана [4]), что соответствует представлению порового пространства в виде набора цилиндрических капилляров. На практике величина n может принимать и большие значения, например в монографии [5] приводится значение $n = 10$. В расчетах было выбрано значение $n = 6$.

Расчет приемистости скважины осуществлялся на основе решения задачи о притоке жидкости в скважину из пласта с зональной неоднородностью [4]:

$$A = \frac{Q}{\Delta p} = \frac{2\pi h}{\mu} \left(\frac{1}{k} \ln(r_f/r_b) - \frac{1}{k_0} \ln(R/r_f) \right)^{-1},$$

где $\Delta p = p_R - p_b$, p_R и p_b – давление на контуре питания и на забое скважины соответственно, R – радиус контура питания скважины, μ – вязкость пластовой воды. В расчетах были приняты значения $R = 250 \text{ м}$; $\mu = 1 \text{ сПз}$.

Рис. 2 иллюстрирует эволюцию во времени радиуса загрязненной зоны (скин зоны) r_f , где химическая реакция уже завершилась. За время закачки воды ее радиус увеличился до 4,3 м.

На рис. 3 представлено изменение коэффициента приемистости скважины по мере закачки жидкости. По данным прямых замеров, коэффициент приемистости скважины A после осуществления закачки воды составил 38,45 ($\text{м}^3/\text{сут}$)/атм; в расчетах значение A при $t = 50$ часов равно 43,2 ($\text{м}^3/\text{сут}$)/атм, что в достаточной мере воспроизводит реальную картину.

КПД проводилась глубинным манометром-термометром, спущенным на глубину 1030 м.

Результаты интерпретации КПД позволили выделить две зоны вокруг скважины: ближнюю низкопроницаемую зону (загрязненную зону) с проницаемостью равной 58 мД, и дальнюю высокопроницаемую с проницаемостью $k_0 = 1228 \text{ мД}$, что соответствует аномальному значению скин-фактора $S = 75,3$. Радиус зоны пониженной проницаемости по данным исследования составил 4,6 м.

Анализ данной ситуации позволил сформулировать несколько причин аномального значения скин-фактора; наиболее вероятным представляется образование низкопроницаемой зоны в результате закачки воды с отличными от пластовой воды физико-химическими свойствами и выпадения осадка в зоне вблизи скважины, вследствие этого приводящее к снижению проницаемости в этой зоне.

Для подтверждения данной гипотезы были проведены расчеты по разработанной модели для следующих значений параметров задачи:

$\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$; $r_b = 0,1 \text{ м}$; $h = 50 \text{ м}$; $V_0 = 1000 \text{ м}^3$;

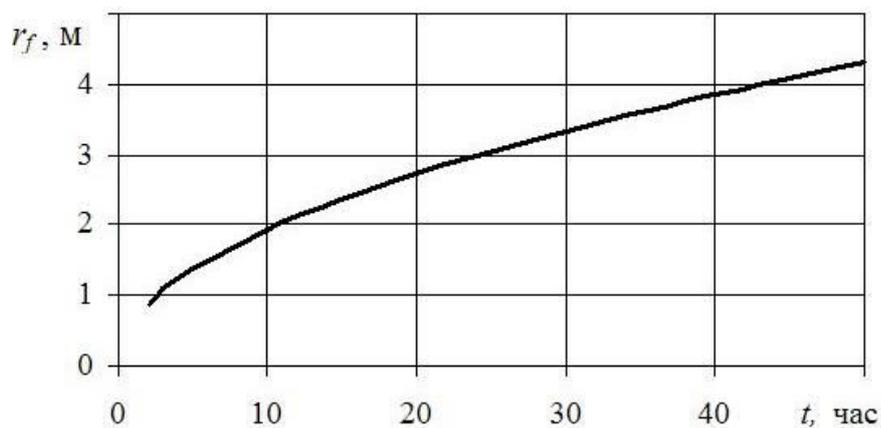


Рис.2

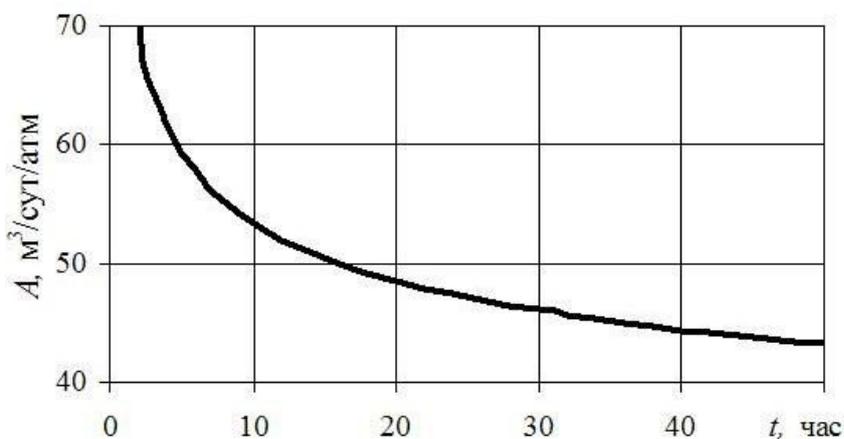


Рис.3

В расчетах значение проницаемости загрязненной зоны составило $k = 63$ мД, а соответствующие значение скин-фактора $S = 69,3$. Сопоставление расчетных значений с данными интерпретации КПД показывает, что предложенный механизм загрязнения призабойной зоны с большой вероятностью является причиной формирования аномального значения скин-фактора. Проведенный анализ показывает важность исследований по совместимости пластовой и закачиваемой вод и возможные последствия пренебрежения этими исследованиями.

Список литературы

1. Р.И. Нигматулин. Динамика многофазных сред. Ч.1. М.: Наука, 1987. 464 с.
2. К.М. Федоров. Нестационарная фильтрация при наличии химической реакции с пористой средой // Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. № 1. С.82-87.
3. Физическая химия. Под ред. К.С. Краснова. М.: Высшая школа, 2001. С.93-129.
4. Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 211 с.
5. В.Н. Николаевский. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с.