

4. Голященко А.В. Поиск и разведка нефтяных залежей с наклонным водонефтяным контактом // Нефтяное хозяйство. 2006. № 8. С. 42-46.

5. Арье А.Г., Славкин В.С. О механизме нефтегазонасыщения песчаных линз в глинах // Геология нефти и газа. 1998. № 2. С. 32-38.

Константин Михайлович ФЕДОРОВ —
зав. кафедрой моделирования
физических процессов и систем,
доктор физико-математических наук, профессор
Тюменский государственный университет
kfedorov@utmn.ru

Наиль Габсалямович МУСАКАЕВ —
зав. лабораторией гидродинамики многофазных сред
Тюменского филиала Института теоретической
и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН,
кандидат физико-математических наук, доцент
timms@tmn.ru

Вячеслав Леонидович ТЕРЕНТЬЕВ —
директор ООО «НТЦ Ойлтим»

Константин Сергеевич ГРИГОРЬЕВ —
начальник отдела моделирования
ООО «НТЦ Ойлтим»
grigorevks@siamoil.ru

УДК 532.546:542.9

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ НИЗКОПРОНИЦАЕМОЙ ЗОНЫ ВБЛИЗИ ЗАБОЯ СКВАЖИНЫ ЗА СЧЕТ ВЫПАДЕНИЯ ОСАДКА

MECHANISM OF NEAR WELLBORE DAMAGE DUE TO PRECIPITATION FORMATION

АННОТАЦИЯ. Построена математическая модель процессов, происходящих в пористой среде при смешении вод с различным химическим составом. На основе результатов аналитического решения данной модели показано, что наиболее вероятной причиной образования низкопроницаемой зоны вблизи забоя скважины в результате закачки воды с отличными от пластовой воды химическими свойствами является выпадение твердого осадка в этой зоне.

SUMMARY. A mathematical model of the process of injection and reservoir water mixture in a near well zone was developed. On the basis of analytical solution it was established that the probable reason of near wellbore damage could be the formation of precipitation due to chemical reaction of active components.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Фильтрация, призабойная зона скважины, химическая реакция, математическая модель, аналитическое решение, скин-фактор.

KEY WORDS. Flow through porous media, near wellbore zone, chemical reaction, mathematical model, analytical solution, skin factor.

Зачастую закачка воды с отличными от пластовой воды физико-химическими свойствами может приводить к существенному ухудшению коллекторских свойств участка пласта вблизи скважины. Возможной причиной снижения проницаемости может служить образование в призабойной зоне скважины твердого осадка. Понимание процессов, происходящих в пласте при смешении вод с различным химическим составом, является важной практической задачей. Поэтому разработка математической модели процесса и его теоретическое исследование являются актуальной проблемой.

Математическая модель. Будем рассматривать задачу о закачке в пористый пласт воды в рамках многокомпонентной изотермической фильтрации однофазной несжимаемой жидкости [1]; [2]. Положим, что задача является осесимметричной, т.е. распределение реагентов, скорости потока в призабойной зоне зависят только от радиуса. В практике нефтедобычи 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 достаточно точно. 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.

Рассмотрим типичную химическую реакцию, которая может происходить в пористой среде при смешении вод с различным химическим составом:



Важным аспектом задачи является механизм смешения пластовой и закачиваемых вод. В предлагаемой модели считается, 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. Запишем уравнения неразрывности в рамках сделанных допущений для каждого компонента приведенной реакции:

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

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

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

$$\rho_w (1 - S_{wr}) \frac{\partial c_4 m}{\partial t} + \rho_w (1 - S_{wr}) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r m v c_4) = -\chi_4 J,$$

$$\rho_w (1 - S_{wr}) \frac{\partial c_5 m}{\partial t} + \rho_w (1 - S_{wr}) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r m v c_5) = -\chi_5 J,$$

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.

Так как в пластовых условиях выделяющийся углекислый газ будет полностью растворен в воде, то последние два уравнения системы (1) можно сложить, записав сумму в виде

$$\rho_w (1 - S_{wr}) \frac{\partial \tilde{c}_4 m}{\partial t} + \rho_w (1 - S_{wr}) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rmv \tilde{c}_4) = -\tilde{\chi}_4 J, \quad (2)$$

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

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

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

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

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 Амаго, 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:

$$rmv = Q_0 / 2\pi h, \quad (3)$$

где h — мощность продуктивного пласта.

Из первого уравнения системы (1) выразим J и подставим в другие уравнения этой системы, учитывая при этом соотношения (2) и (3),

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ (1 - S_{wr}) mc_2 - \chi_2 S_{wr} mc_1 \right\} + (1 - S_{wr}) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{Q_0}{2\pi h} c_2 \right) = 0, \quad (4)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ (1 - S_{wr}) m \tilde{c}_4 + \tilde{\chi}_4 S_{wr} mc_1 \right\} + (1 - S_{wr}) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{Q_0}{2\pi h} \tilde{c}_4 \right) = 0.$$

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 (4):

$$m_0 \frac{\partial}{\partial t} \left\{ (1 - S_{wr}) c_2 - \chi_2 S_{wr} c_1 \right\} + (1 - S_{wr}) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{Q_0}{2\pi h} c_2 \right) = 0, \quad (5)$$

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

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

Для дальнейшей работы с системой уравнений введем безразмерные координаты: $X = \pi h m_0 (r^2 - r_b^2) / V_0$, $T = (Q_0 / V_0) t$, где V_0 — объем закачанной воды. Выразив систему (5) в новых координатах, получим:

$$\frac{\partial}{\partial T} \left\{ (1 - S_{wr}) c_2 - \chi_2 S_{wr} c_1 \right\} + \frac{\partial}{\partial X} \left\{ (1 - S_{wr}) c_2 \right\} = 0, \quad (6)$$

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

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

Аналитическое решение. 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 (6) в этом случае представляется в виде трех зон: I) зона вблизи скважины, где химическая реакция уже завершилась ($0 < X < X_f$); II) зона, в которую вытеснены продукты реакции ($X_f < X < X_v$); III) зона пласта, еще не затронутая реакцией ($X > X_v$).

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

$$D \left[(1 - S_{wr}) c_2 - \chi_2 S_{wr} c_1 \right] = (1 - S_{wr}) [c_2], \quad (7)$$

$$D \left[(c_3 + \chi_3 c_1) \right] = 0,$$

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

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

Из (7) 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^* .

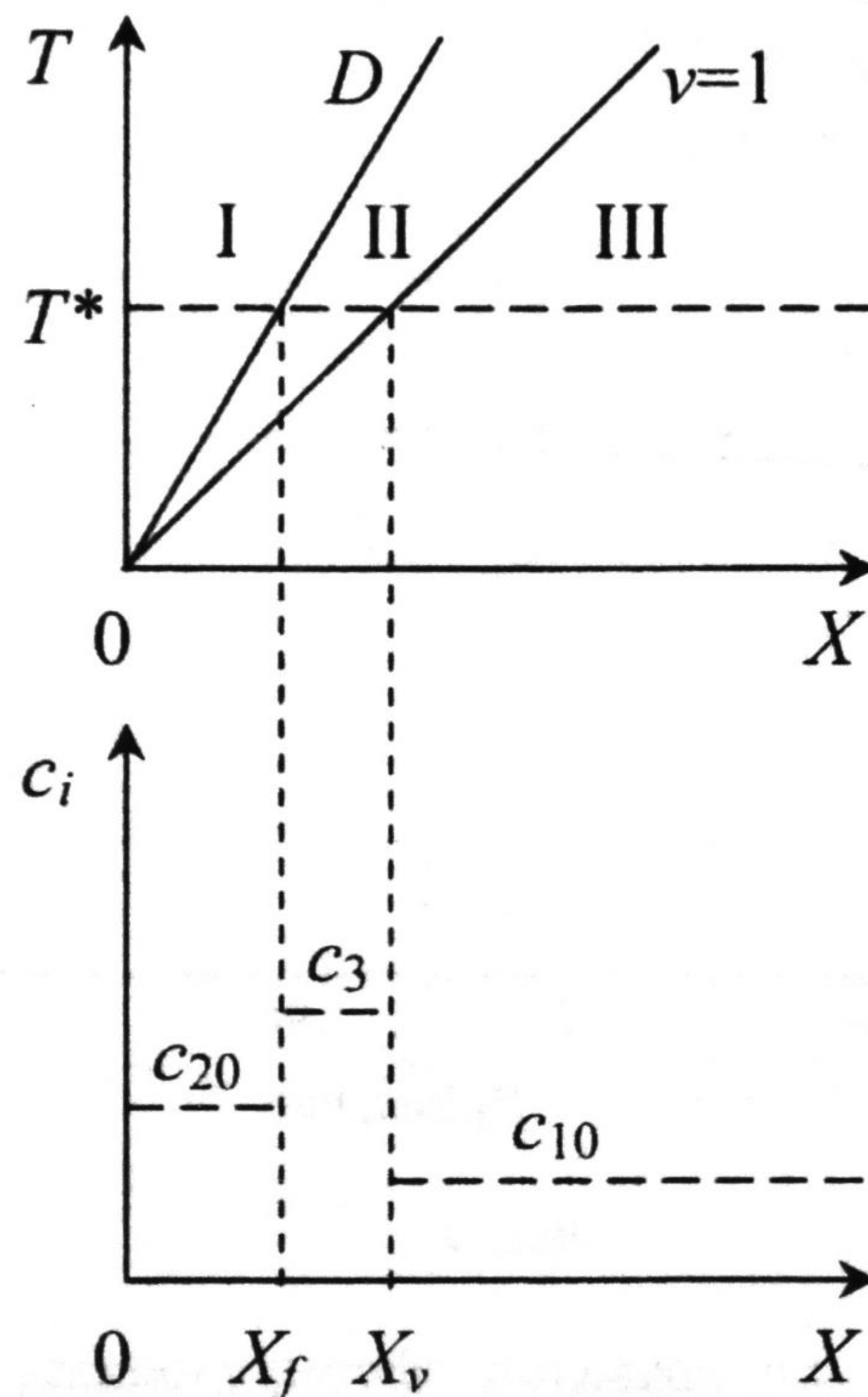


Рис. 1

Оценка зоны загрязнения призабойной зоны выпадающими солями. Применим результаты решения системы (7) для анализа проведенного исследования разведочной скважины № 19 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 м^3 , закачка осуществлялась в течение 50 часов, запись КПД проводилась глубинным манометром-термометром САМТ-02, спущенным на глубину 1030 м. Ход проведения исследования представлен на рис. 2.

Интерпретация КПД проводилась с использованием программного продукта PANSYSTEM. Результаты интерпретации КПД позволили выделить две зоны вокруг скважины: ближнюю низкопроницаемую зону (загрязненную) 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.

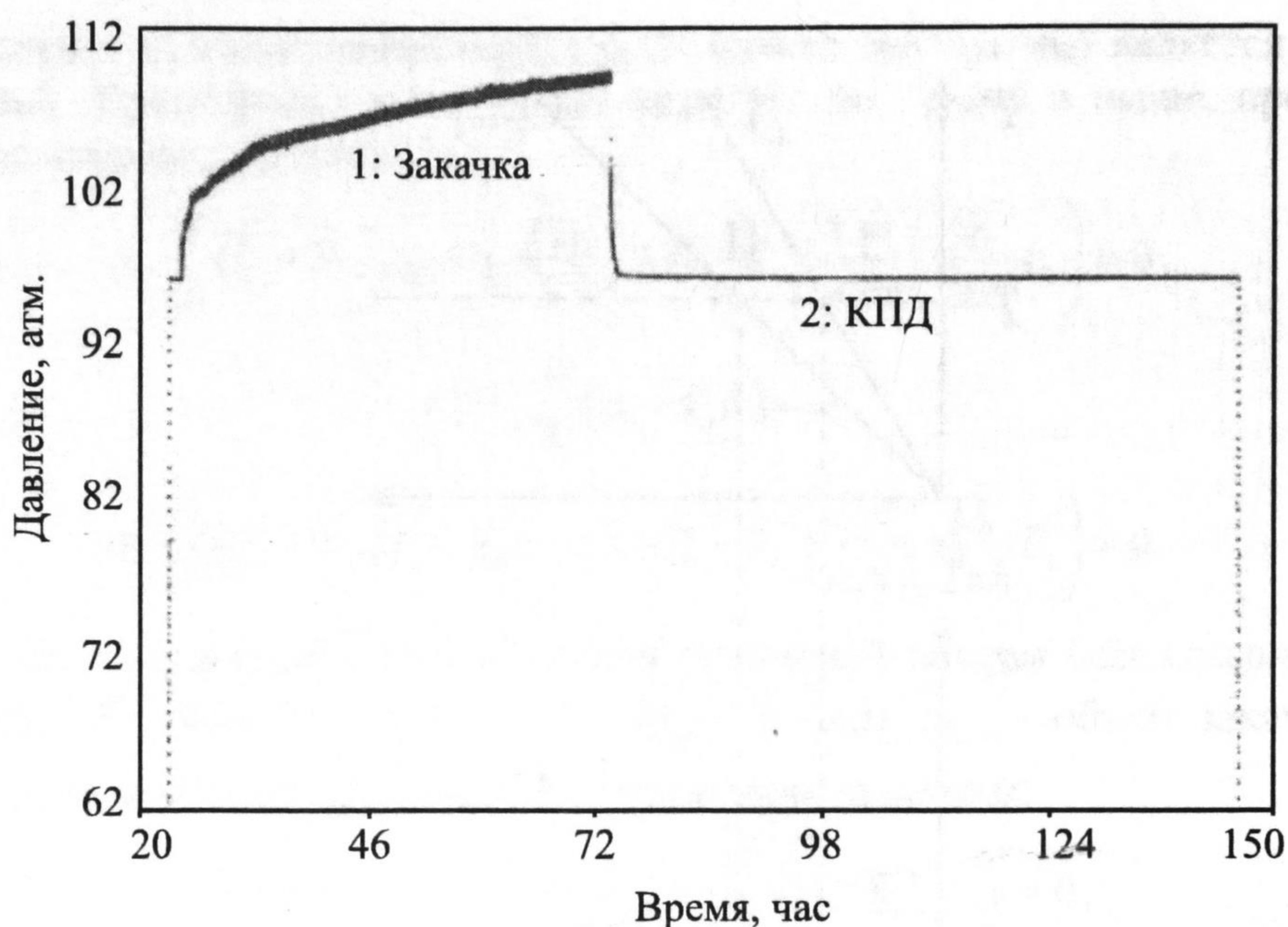


Рис. 2

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

Для подтверждения данной гипотезы были проведены расчеты по разработанной модели для следующих значений параметров задачи: $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$; $r_b = 0,1 \text{ м}$; $h = 50 \text{ м}$; $V_0 = 1000 \text{ м}^3$; $Q_0 = 480 \text{ м}^3/\text{сут}$; $m_0 = 0,2$; $S_{wr} = 0,26$; $c_{10} = 0,06$; $c_{20} = 0,09$; $k_0 = 1228 \text{ мД}$.

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 [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 $R = 250$ м; $\mu = 1$ сПз.

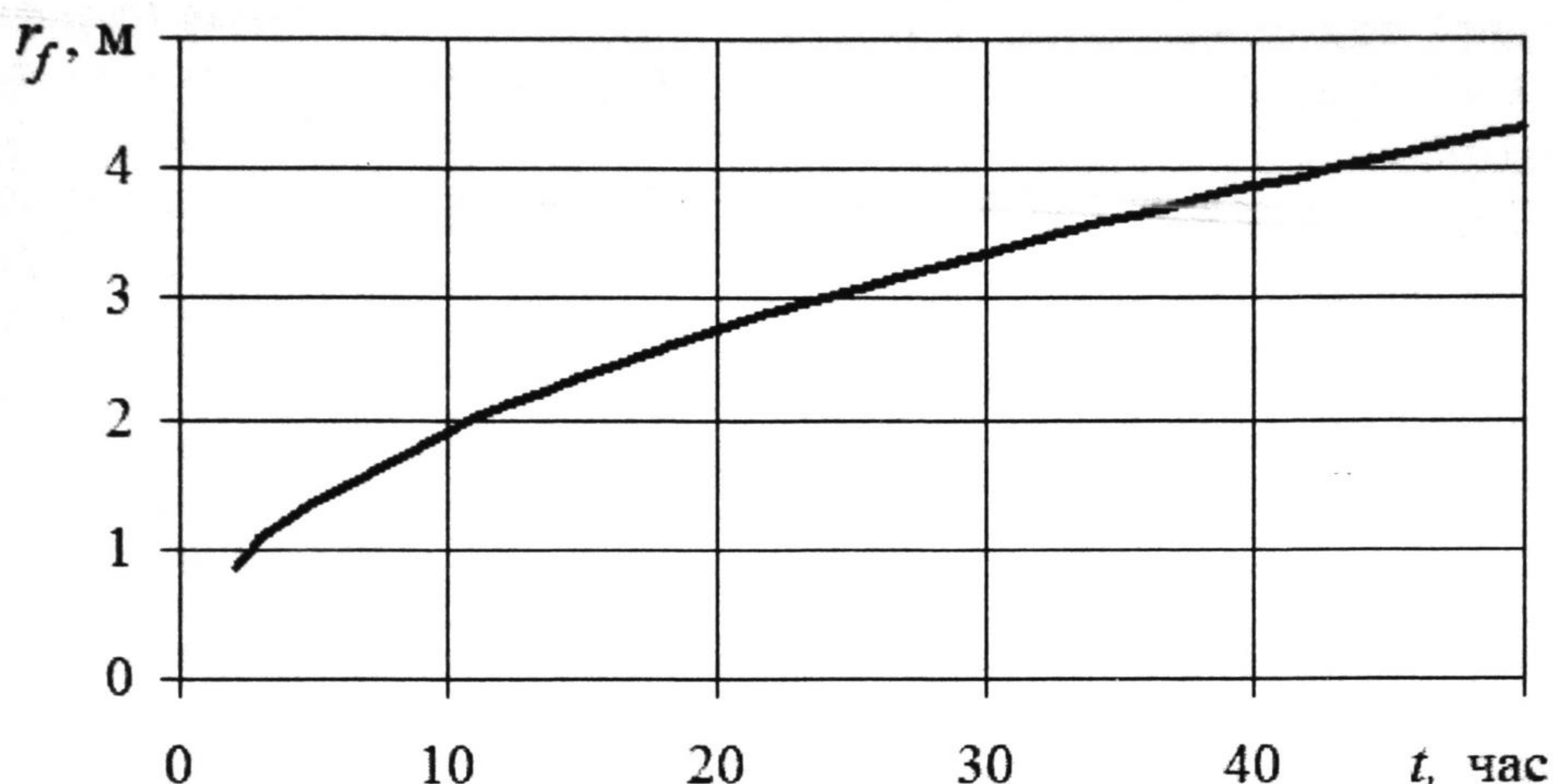


Рис. 3

На рис. 3 представлена эволюция 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.

По данным прямых замеров коэффициент приемистости скважины 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.

В расчетах значение проницаемости загрязненной зоны составило $k = 63$ мД, а соответствующее 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 химических исследований по совместимости пластовой и закачиваемой вод и возможные последствия пренебрежения этими исследованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
2. Федоров К.М. 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. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 211 с.
5. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с.