

УДК 532.546:541.12

**РАСЧЕТ ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ТВЕРДОЙ И ЖИДКОЙ ФАЗ
ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ ЖИДКОСТИ**

КАРИМОВ М. Ф., МУХАМЕДШИН Р. К.

В статье рассмотрена фильтрация химически активной жидкости через пористую среду. При некоторых предположениях получено аналитическое решение, описывающее распределение концентрации химически активного компонента и изменение пористости твердой фазы. На основании полученных результатов рассматривается оптимизация солянокислотных обработок скважин.

1. Рассмотрим фильтрацию химически активного компонента в пористой среде, сопровождающуюся массообменом между жидкой и твердой фазами.

Запишем уравнения неразрывности по фазам и по компоненту:

$$\frac{\partial}{\partial t}(m\rho_f) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv_f\rho_f) = \dot{M}_f \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(m\rho_h) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv_h\rho_h) = \dot{M}_h \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-m)\rho_s] = \dot{M}_s \quad (1.3)$$

где m — пористость; ρ_f , ρ_h , ρ_s — плотности соответственно жидкой фазы, компонента в жидкой фазе, твердой фазы; v_f , v_h — скорости фильтрации соответственно жидкой фазы и компонента; \dot{M}_f , \dot{M}_h и \dot{M}_s — величины, характеризующие изменение массы фазы или компонента в единице объема в результате физико-химического взаимодействия [1].

Задачу будем решать в рамках диффузионного приближения ($v_f = v_h$). Изменением плотности жидкой фазы пренебрегаем. Уравнение движения принимаем в виде $v = Q/r$, где Q — постоянный расход жидкой фазы на единицу толщины пористой среды.

Предположим, что стехиометрия химической реакции между жидкой и твердой фазами известна. Тогда $\dot{M}_f = \alpha_1 \dot{M}_h$, $\dot{M}_s = -\alpha_1 \dot{M}_h$, где α_1 — постоянная величина.

Переходя в уравнениях (1.2) и (1.3) к концентрации компонента $C = \rho_h/\rho_f$, получаем [2]

$$\frac{\partial}{\partial t}(mC) + \frac{Q}{r} \frac{\partial C}{\partial r} = \frac{\dot{M}_h}{\rho_f} \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -\alpha \frac{\dot{M}_h}{\rho_f}, \quad \alpha = \alpha_1 \frac{\rho_f}{\rho_s}$$

Будем считать, что закачка раствора в пористую среду с пористостью m_0 происходит с постоянным расходом Q , концентрацией химически активного компонента C_0 в течение времени T . Таким образом, начальные

и граничные условия выписываются следующим образом:

$$\begin{aligned} m(r, 0) = m_0, \quad C(r, 0) = 0 \\ C(0, t) = C_0, \quad 0 < t \leq T; \quad C(0, t) = 0, \quad t > T \end{aligned} \quad (1.5)$$

Считаем, что физико-химический массообмен между фазами определяется только концентрацией химически активного компонента.

Уравнения (1.4) перепишем в виде

$$\begin{aligned} m \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{Q}{r} \frac{\partial C}{\partial r} = -(1 + \alpha C) f(C) \\ \frac{\partial m}{\partial t} = \alpha f(C), \quad f(C) = -\frac{M_h}{\rho_f} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Так как уравнение по концентрации компонента в (1.6) гиперболического типа, выписывая его решение на характеристиках, получаем следующие соотношения:

$$\frac{dC}{f(C)(1 + \alpha C)} = -\frac{dr^2}{2Q}, \quad dt = \frac{m(r, t)}{2Q} dr^2 \quad (1.7)$$

Второе дифференциальное уравнение (1.7) позволяет определить область концентрационной волны компонента. Первое дифференциальное уравнение (1.7) определяет концентрацию компонента в этой области. Очевидно, что при условиях (1.5) распределение концентрации по радиусу внутри концентрационной волны в период закачки реагента стационарно ($C = \varphi(r)$).

Характеристики имеют вид

$$t = \frac{m_0}{2Q} r^2 + t_1 \exp \left\{ \frac{\alpha}{Q} \int_0^r r f[\varphi(r)] dr \right\}$$

Текущая пористость в точке (r, t) , расположенной внутри концентрационной волны по (1.4), определится как

$$m(r, t) = m_0 + \alpha f(C) \left(t - \frac{m_0}{2Q} r^2 \right), \quad r \leq \sqrt{\frac{2Qt}{m_0}} \quad (1.8)$$

Определим распределение пористости по радиусу на конец физико-химического воздействия. Если в момент T закачка раствора прекращается, то к этому моменту времени распределение пористости

$$m(r, T) = m_0 + \alpha f(C) \left(T - \frac{m_0}{2Q} r^2 \right), \quad r \leq \sqrt{\frac{2QT}{m_0}}$$

Будем считать, что после прекращения закачки жидкость в пористой среде неподвижна: $Q = 0$. Тогда из (1.4) имеем $m(1 + \alpha C) = m_0$. Так как окончание физико-химического воздействия определяется полной нейтрализацией химически активного компонента, то окончательное распределение пористости получаем в виде

$$m_1(r) = m(r, T) (1 + \alpha C), \quad r \leq \sqrt{2QT/m_0} \quad (1.9)$$

Если в момент времени T прекращается подача только химически активного компонента, а жидкость продолжает нагнетаться с тем же расходом Q , то окончательное распределение пористости можно определить вдоль характеристики при $t_1 = T$

$$m_2(r) = m_0 + \alpha T f(C) \exp \left\{ \frac{\alpha}{Q} \int_0^r r f[\varphi(r)] dr \right\} \quad (1.10)$$

2. Рассмотрим различные вероятные случаи массообмена между фазами. Допустим, что уравнение кинетики массообмена в (1.6) вполне определяется уравнением кинетики химической реакции первого порядка. Тогда $f(C) = \gamma C$, где γ — постоянный коэффициент.

Решение уравнения (1.7) в этом случае определяет концентрацию в виде

$$C(r) = C_0 [(1 + \alpha C_0) \exp(\gamma r^2 / 2Q) - \alpha C_0]^{-1} \quad (2.1)$$

Если уравнение кинетики массообмена имеет вид $f(C) = \gamma C^\beta$, где β — положительное не целое число, то в этом случае (1.7) дает

$$\frac{\gamma r^2}{2Q} = \sum_{n=0}^{\infty} (-\alpha)^n \frac{C_0^{n+1-\beta} - C^{n+1-\beta}}{n+1-\beta} \quad (2.2)$$

Концентрацию компонента в явном виде определить не удастся, поэтому определение окончательного распределения пористости необходимо проводить численными методами.

Если в первом уравнении (1.4) пренебречь в левой части слагаемым $C \partial m / \partial t$ по сравнению со слагаемым $m \partial C / \partial t$, то получаем приближенное аналитическое решение

$$C(r) = [C_0^{1-\beta} - \gamma r^2 (1-\beta) / 2Q]^{1/(1-\beta)} \quad (2.3)$$

Это решение можно получить из (2.2) при отбрасывании в правой части всех слагаемых, кроме нулевого. Это позволяет легко оценить погрешность данной формулы.

Если уравнение кинетики массообмена имеет вид $f(C) = \gamma C^k$, где k — целое, > 1 , то решением уравнения (1.7) будет

$$\frac{\gamma r^2}{2Q} = (-\alpha)^{k-1} \left[\ln \frac{C_0}{C} + \sum_{n=0}^{\infty} (-\alpha)^n \frac{C_0^{n-k} - C^{n-k}}{n} - \sum_{n=1}^{k-1} (-\alpha)^{-n} \frac{(C_0^{-n} - C^{-n})}{n} \right]$$

При отбрасывании слагаемого $C \partial m / \partial t$ в (1.4) в этом случае получаем зависимость вида (2.3).

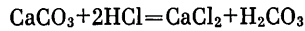
3. Во всех полученных в явном виде функциях распределения пористости по радиусу в результате физико-химического воздействия основными параметрами являются C_0 , T , Q , γ . Если ввести в рассмотрение массу химически активного компонента, закачиваемую в процессе обработки на единицу толщины M , то итог воздействия будут определять только три параметра: C_0 — начальная концентрация, M/ρ_f и Q/γ .

Допустим, что физико-химическое воздействие осуществляется с целью повышения дебита скважины. Под эффективностью обработки в этом случае будем понимать увеличение дебита скважины, т. е. величину F , равную отношению дебита скважины после обработки к ее дебиту до обработки. Оценим эффективность, используя стационарный радиальный приток жидкости к одиночной скважине. В этом случае при одной и той же депрессии

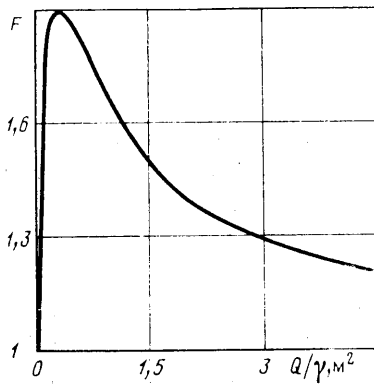
$$\frac{1}{F} = \frac{K_0}{\ln(R_k/r_0)} \int_{r_0}^{R_k} \frac{dr}{rK(r)} \quad (3.1)$$

Реально предположить, что для конкретного пласта-коллектора существует корреляционная зависимость между пористостью и проницаемостью: $K(r) = \Phi[m(r)]$. В этом случае минимизация интеграла в формуле (3.1) по определенным кривым пористости позволяет для данного значения M определить параметры обработки C_0 и Q .

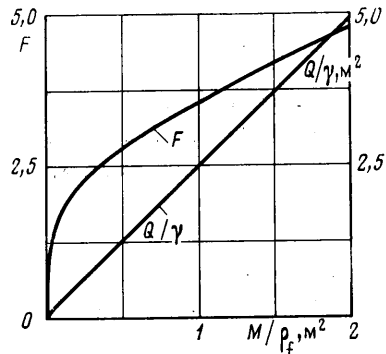
Рассмотрим для примера солянокислотную обработку скважины карбонатного пласта.



Для этой реакции получим $\alpha_1 = 100/73$, тогда $\alpha = 0,5$. Оценим эффективность, используя (1.10) и (2.1), а также зависимость $m = 6,32 K^{0,19}$ для карбонатного пласта Осташковического месторождения [3]. Результаты расчетов представлены на фиг. 1, 2. На фиг. 1 показана зависимость эффективности обработки от темпа закачки раствора



Фиг. 1



Фиг. 2

при $M/\rho_f = 0,1 \text{ м}^2$. На фиг. 2 показаны зависимости эффективности и оптимального темпа закачки раствора от количества кислоты используемого на единицу толщины пласта. Качественные результаты в других случаях аналогичны.

По результатам расчетов надо отметить существование оптимального темпа закачки раствора для данного значения M . В рассматриваемом случае, при закачке 100 кг соляной кислоты на 1 м толщины пласта оптимальное соотношение $Q/\gamma = 0,3 \text{ м}^2$. Зная γ , таким образом можно определить темп закачки Q . Если необходимый темп закачки раствора не может быть достигнут вследствие условий работы скважины, то необходимо изменить величину γ либо путем добавок в раствор, либо выбором другой кислоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 1973, 536 с.
2. Lund K., Fogler H. S. The prediction of the movement of acid and permeability fronts in sandstone.— Chem. Eng. Sci., 1976, v. 31, № 5, p. 381–392.
3. Котляков Ф. И. Физика нефтяных и газовых коллекторов. М.: Недра, 1977. 287 с.

Уфа

Поступила в редакцию
29.IV.1984