УДК 536.532

К ЗАДАЧЕ О ЗАКАЧКЕ РАСТВОРИТЕЛЯ В ПРИЗАБОЙНУЮ ЗОНУ ПЛАСТА

Карамов И. Ф.
научный руководитель к. ф.-м.н. Хусаинова Г.Я.
СФ БашГУ

Одной из наиболее распространенных причин ухудшения коллекторных характеристик пласта в призабойной зоне нефтяных скважин является "склеротические" изменения за счет отложения твердой фазы (парафинов, например) на стенки поровых каналов. В большинстве случаях удаление этих отложений можно осуществить закачкой растворителя. Необходимые оценки для проведения технологических расчетов с применением растворителя можно получить на основе решений плоскоодномерной и радиальносимметричной задач. В частности, если радиальносимметричная постановка позволяет проанализировать очищение пористой среды вокруг скважины, то плоскоодномерная задача дает возможность проследить эти процессы вблизи трещин (образованных при гидроразрыве, например). Некоторые аспекты вытеснения углеводородной жидкости из пористых сред с помощью растворителей рассмотрены в[1,2].

1.Основные уравнения. Пусть среда с пористостью m в исходном состоянии частично закупорена твердой фазой, которая растворяется в закачиваемой жидкости. В исходном состоянии объемная доля, занятая твердой фазой, равна ν и поэтому "живая" пористость составляет $m' = (1-\nu)m$. Кроме того, засоренная пористая среда, в свою очередь, насыщена жидкостью. При закачке растворителя в такую систему можно выделить три характерные зоны, а именно ближнюю, очищенную от твердой фазы пористую среду (с пористостью m), где в порах находится чистый растворитель; вторую, промежуточную зону (с пористостью m'), в который фильтруется насыщенный твердой фазой растворитель; и третью, дальнюю зону, где происходит фильтрационное течение исходной насыщающей жидкости. Здесь отметим, что согласно принятым представлениям в этих трех зонах, вообще говоря, находятся три разные жидкости, отличающиеся вязкостью , а также равновесными значениями плотности. Параметры, соответствующие этим трем зонам будут снабжены индексами 1, 2 и 3 внизу. Будем полагать, что фильтрационные процессы при закачке растворителя происходят при упругом режиме. Тогда линейное уравнение пьезопроводности и закон Дарси могут быть записаны в виде

$$\frac{\partial p_i}{\partial t} = \chi_i \frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^n \frac{\partial p_i}{\partial r}\right),\ u_i = m_i \upsilon_i = -\frac{k_i}{\mu_i}\frac{\partial p_i}{\partial r}, \qquad (1.1)$$

$$\chi_i = \frac{k_i}{\mu_i \beta_i},\ \beta_i = m_i\beta_{li} + \beta_{si},\ m_1 = m,\ m_2 = m_3 = m' = m(1-\nu),\ k_2 = k_3.$$

Здесь p_i, υ_i и u_i - давление, истинная скорость и скорость фильтрации; (ρ_i - равновесная плотность жидкости), m_i, k_i, β_{li} , β_{si} и μ_i, - коэффициенты пористости, проницаемости, упругоемкости жидкости, пласта и динамическая вязкость, χ_i - коэффициент пьезопроводности, n=0 и 1 соответствуют плоскоодномерной и радиально симметричной задачам.

Отметим, что принятые выше допущения для структуры зон фактически пренебрегают протяженностью областей, в которых происходит растворение и смывание твердой фазы. И тем самым эти области заменяются поверхностями разрывов для части переменных (скорости фильтрации, например) и параметров, определяющих фильтрационные характеристики (пористость, проницаемость, вязкость). Кроме того, в дальнейшем будем пренебрегать гидравлическим сопротивлением в этих областях и на границах между зонами потребуем условие непрерывности давления

$p_1=p_2=p_{(12)}$ $(r=r_{(12)})$, $p_2=p_3=p_{(23)}$ $(r=r_{(23)})$.

Из закона сохранения масс для всей системы растворитель-твердая фаза в целом на границе между первой и второй зонами следует

$$\rho_1 m_1\left(\upsilon_1-\frac{dr_{(12)}}{dt}\right)=\rho_2 m_2\left(\upsilon_2-\frac{dr_{(12)}}{dt}\right)-\rho_s m\nu\frac{dr_{(12)}}{dt}\ , \qquad (r=r_{(12)}), \tag{1.2}$$

где ρ_s-плотность твердой фазы. Запишем также уравнение сохранения массы растворителя на этой границе

$$\rho_1 m_1\left(\upsilon_1-\frac{dr_{(12)}}{dt}\right)=(1-g)\rho_2 m_2\left(\upsilon_2-\frac{dr_{(12)}}{dt}\right)\ , \qquad (r=r_{(12)} \tag{1.3}$$

здесь g - массовая концентрация твердой фазы в растворителе в состоянии насыщения. Уравнения (1.2) и (1.3) записаны в линеаризованном приближении, принимая для плотностей жидкостей их равновесные значения. Отметим также, что учет изменения плотностей за счет повышения давления по сравнении равновесным значением внесет ошибку порядка $\Delta\tilde{\rho}_i<<1\,(\Delta\tilde{\rho}_i=\dfrac{\Delta\rho_i}{\rho_i}$, $\Delta\rho_i$-максимальное изменение плотности из-за сжатия). Соотношение (1.2) и (1.3) с учетом закона Дарси из (1.1) могут быть представлены в виде

$$\rho_1\frac{k_1}{\mu_1}\frac{\partial p_1}{\partial r}-\rho_2\frac{k_2}{\mu_2}\frac{\partial p_2}{\partial r}=m\big(\rho_2(1-\nu)+\rho_s\nu-\rho_1\big)\frac{dr_{(12)}}{dt},$$

$$\rho_1\frac{k_1}{\mu_1}\frac{\partial p_1}{\partial r}-(1-g)\rho_2\frac{k_2}{\mu_2}\frac{\partial p_2}{\partial r}=m\big((1-g)\rho_2(1-\nu)-\rho_1\big)\frac{dr_{(12)}}{dt},(r=r_{(12)}).$$

Для удобства в дальнейшем эти выражения преобразуем к виду

$$\frac{k_1}{\mu_1}\frac{\partial p_1}{\partial r}=-m\frac{(1-g)\rho_s\nu+g\rho_1}{g\rho_1}\frac{dr_{(12)}}{dt},$$

$$\frac{k_2}{\mu_2}\frac{\partial p_2}{\partial r}=-m\frac{g\rho_2(1-\nu)+\rho_s\nu}{g\rho_2}\frac{dr_{(12)}}{dt}, \tag{1.4}$$

$(r=r_{(12)})$.

На границе между второй и третьей зонами полагаем условие несмешивающегося вытеснения. Тогда для этого условия, выражающего, что данная граница является и поверхностью контактного разрыва, можем записать

$$\rho_2 m_2\left(\upsilon_2-\frac{dr_{(23)}}{dt}\right)=\rho_3 m_3\left(\upsilon_3-\frac{dr_{(12)}}{dt}\right)=0, \qquad (r=r_{(23)}).$$

Отсюда, с учетом закона Дарси из (1.1) имеем

$$\frac{k_2}{\mu_2}\frac{\partial p_2}{\partial r} = \frac{k_3}{\mu_3}\frac{\partial p_3}{\partial r} = -m(1-\nu)\frac{dr_{(23)}}{dt}, \qquad (r=r_{(23)}). \qquad (1.5)$$

В случае отсутствия твердых отложений в исходном состоянии ($\nu = 0$) следует, что промежуточная область будет отсутствовать ($r_{(12)} = r_{(23)}$), и тогда получим известные результаты [3].

Если, для зависимостей коэффициентов абсолютной проницаемости от «живой» пористости, принять формулы Козейи-Кармана, то можем записать

$$k_1 = k_0 \frac{m^3}{(1-m)^2}, \; k_2 = k_3 = k_0 \frac{m^3(1-\nu)^3}{(1-m(1-\nu))^2}. \qquad (1.6)$$

Здесь k_0 -параметр, отвечающий за характерные размеры пор.

2. **Плоскоодномерная задача** $(n = 0, r = x)$. Пусть закачка растворителя происходит при внезапном повышении давления до некоторого постоянного значения p_e на границе пористой среды. При этом начальное давление в пористой среде равно p_0 ($p_e > p_0$). Отмеченные начальное и граничное условия могут быть записаны в виде

$$p_3 = p_0, \quad (x > 0, t = 0\;), \; p_1 = p_e, \quad (x = 0, t > 0). \qquad (2.1)$$

Эта задача имеет автомодельное решение, которое имеет вид

$$p_1 = p_e + (p_{(12)} - p_{(e)})\frac{\int_0^{\xi} \exp(-\frac{\xi'^2}{4})d\xi'}{\int_0^{\xi_{(12)}} \exp(-\frac{\xi'^2}{4})d\xi'}, \qquad (0 < \xi < \xi_{(12)}),$$

$$p_2 = p_{(12)} + (p_{(23)} - p_{(12)})\frac{\int_{\xi_{(12)}}^{\xi} \exp(-\frac{\xi'^2}{4\eta_2})d\xi'}{\int_{\xi_{(12)}}^{\xi_{(23)}} \exp(-\frac{\xi'^2}{4\eta_2})d\xi'}, (\xi_{(12)} < \xi < \xi_{(23)}),$$

$$p_3 = p_{(23)} + (p_{(0)} - p_{(23)})\frac{\int_{\xi_{(23)}}^{\xi} \exp(-\frac{\xi'^2}{4\eta_3})d\xi'}{\int_{\xi_{(23)}}^{\infty} \exp(-\frac{\xi'^2}{4\eta_3})d\xi'}, (\xi_{(23)} < \xi < \infty),$$

$$(\xi = x / \sqrt{\chi_1 t}), \eta_i = \chi_i / \chi_1 \;\; (i = 2,3)).$$

Используя эти решения на основе граничных условий (1.4) и (1.5) можно получить следующую систему транцендентных уравнений для определения в автомодельных переменных координат границ $\xi_{(12)}$ и $\xi_{(23)}$ между зонами и значений давлений $p_{(12)}$ и $p_{(23)}$ на этих границах

$$\frac{k_1}{\mu_1}\frac{(p_{(12)}-p_{(e)})\exp(-\xi_{(12)}^2/4)}{\int\limits_0^{\xi_{(12)}}\exp(-\frac{\xi'^2}{4})d\xi'}=-m\frac{(1-g)\rho_s\nu+g\rho_1}{g\rho_1}\chi_1\frac{\xi_{(12)}}{2},$$

$$\frac{k_2}{\mu_2}\frac{(p_{(23)}-p_{(12)})\exp(-\xi_{(12)}^2/4\eta_2)}{\int\limits_{\xi_{(12)}}^{\xi_{(23)}}\exp(-\frac{\xi'^2}{4\eta_2})d\xi'}=-m\frac{g\rho_2(1-\nu)+\rho_s\nu}{g\rho_2}\chi_1\frac{\xi_{(12)}}{2},$$

$$\frac{k_2}{\mu_2}\frac{(p_{(23)}-p_{(12)})\exp(-\xi_{(23)}^2/4\eta_2)}{\int\limits_{\xi_{(12)}}^{\xi_{(23)}}\exp(-\frac{\xi'^2}{4\eta_2})d\xi'}=\frac{k_3}{\mu_3}\frac{(p_0-p_{(23)})\exp(-\xi_{(23)}^2/4\eta_3)}{\int\limits_{\xi_{(23)}}^{\infty}\exp(-\xi'^2/4\eta_3)d\xi'}=$$

$$=-m(1-\nu)\chi_1\frac{\xi_{(23)}}{2}$$

Из этой системы нетрудно получить два уравнения для определения $\xi_{(12)}$ и $\xi_{(23)}$ в зависимости от перепада давления Δp $(\Delta p=p_e-p_0)$

$$g\exp\left[\left(\xi_{(23)}^2-\xi_{(12)}^2\right)/4\eta_2\right]=\frac{g\rho_2(1-\nu)+\rho_s\nu}{\rho_2(1-\nu)}\frac{\xi_{(12)}}{\xi_{(23)}},$$

$$\frac{(1-g)\rho_s\nu+g\rho_1}{g\rho_1}\frac{\mu_1}{k_1}\xi_{(12)}\exp(\frac{\xi_{(12)}^2}{4})\int\limits_0^{\xi_{(12)}}\exp\left(-\frac{\xi'^2}{4}\right)d\xi'-$$

$$-(1-\nu)\xi_{(23)}\frac{\mu_2}{k_2}\exp\left(\frac{\xi_{(23)}^2}{4\eta_2}\right)\int\limits_{\xi_{(12)}}^{\xi_{(23)}}\exp\left(-\frac{\xi'^2}{4\eta_2}\right)d\xi'- \qquad (2.2)$$

$$-(1-\nu)\xi_{(23)}\frac{\mu_3}{k_3}\exp\left(\frac{\xi_{(23)}^2}{4\eta_3}\right)\int\limits_{\xi_{(23)}}^{\infty}\exp\left(-\frac{\xi'^2}{4\eta_3}\right)d\xi=-2\frac{\Delta p}{m\chi_1}.$$

При этом значения давлений на границах между зонами можно определить из следующих выражений

$$p_{(12)}=p_e-\frac{1}{2}\frac{\mu_1}{k_1}\xi_{(12)}\chi_1 m\frac{(1-g)\rho_s\nu+g\rho_1}{g\rho_1}\exp\left(\frac{\xi_{(12)}^2}{4}\right)\int\limits_0^{\xi_{(12)}}\exp\left(-\frac{\xi'^2}{4}\right)d\xi'$$

,

$$p_{(23)}=p_0+\frac{1}{2}\frac{\mu_3}{k_3}m(1-\nu)\chi_1\xi_{(23)}\exp\left(\frac{\xi_{(23)}^2}{4\eta_3}\right)\int\limits_{\xi_{(23)}}^{\infty}\exp\left(-\frac{\xi'^2}{4\eta_3}\right)d\xi'.$$

На основе полученных решений были проведены численные расчеты для системы, когда растворителем является керосин, а растворимая твердая фаза – битум.

Для такой системы при температурах T=291 К и 343 К, используя формулу Кендалла, и данные, приведенные в [4] имеем следующие значения параметров: g=0,6 и 0,9, μ_1=0,00137 и 0,0007 Па·с, μ_2=0,00745 и 0,00093 Па·с, μ_3=0,09391 и 0,011 Па·с, $\rho_1 \approx \rho_2 \approx 900$ кг/м^3, $\rho_s \approx 700$ кг/м^3. Для характеристик пористой среды примем следующие значения: m=0,3, $k_1=10^{-12}$ м^2, ν=0,5. Тогда в соответствии с формулами (1.1) и (1.6) имеем $m_2=m_3=0{,}15$, $k_2=k_3=8{,}48\cdot10^{-14}$м^2. Для величин коэффициентов пьезопроводности, используя вышепринятые значения параметров жидкости и пористой среды в разных зонах, получим $\chi_1 \approx 3{,}8$ и $7{,}45\,\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $\chi_2 \approx 0{,}06$ и $0{,}45\,\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, χ_3=0,004 и $0{,}032\,\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$.

Литература

1.Забродин П., Раковский Н.Л., Розенберг М.Д. Вытеснение нефти из пласта растворителем. М.: Недра. 1968, 224 с.

2.Ковалева Л.А., Серегин К.Н. Исследование неизотермического движения взаиморастворимых жидкостей в пористых в пористых средах. Вестн. Башк. ун-та. - 1996.-№1-С.95-98.

3. Веригин Н.Н. Нагнетание вяжущих растворов в горные породы в целях повышения прочности и водонепроницаемости оснований гидротехнических сооружений. Изв. АН Сер ОТН №5, 1952, с.674-687.

4. Саяхов Ф.Л., Ковалева Л.А., Насыров Н.М. Изучение особенностей тепломассообмена в призабойной зоне скважин при нагнетании растворителя с одновременным электромагнитным воздействием. // ИФЖ.1998. Т. 71, №1. С 161-165.