

УДК 532.546

© 1994 г. П. Т. ЗУБКОВ, К. М. ФЕДОРОВ

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОВЯЗКИХ БАРЬЕРОВ В НЕОДНОРОДНЫХ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТАХ

Проведен численный анализ процесса, определяющего механизм формирования высоковязких барьеров в высокопроницаемых зонах пласта при малых характерных временах гелеобразования. Показано, что эффективность процесса определяется последовательностью и размерами закачиваемых оторочек реагентов, которые при их реакции в пласте образуют высоковязкий гель. Конфигурация и место формирования барьера определяется размерами оторочки воды, разделяющей растворы реагентов.

Вытеснение нефти из неоднородных пластов водой сопровождается ранним прорывом воды к добывающим скважинам и обводнением добываемой продукции. С целью ограничения водопритока применяются методы изоляции высокопроницаемых каналов и пропластков в пласте раствором полимера [1], щелочными растворами [2]. Хорошо зарекомендовал себя метод формирования высоковязких гелевых барьеров [3], который заключается в последовательной или одновременной закачке растворов полимеров и многовалентных металлов. Реакция этих реагентов в пласте приводит к образованию высоковязкого полимерного геля. Основной сложностью реализации этого метода является контроль за временем гелеобразования, которое должно приводить к образованию гелевого барьера на некотором расстоянии от скважины и в высокопроницаемых зонах пласта.

Математическое моделирование процесса рассмотрено в [4], где проведен анализ эффективности метода в рамках двухфазного многокомпонентного потока, в котором активные компоненты (полимер и многовалентные ионы металла) могут адсорбироваться и вступать в реакцию. Результаты расчетов показали, что для создания эффективного гелевого барьера в пласте необходимо, чтобы время реакции образования геля было порядка сотен дней.

1. Процесс двухфазной многокомпонентной фильтрации в неоднородном осесимметричном элементе описывается уравнениями массы всего потока, массы воды, масс гелеобразующих компонентов и обобщенным законом Дарси

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(rk_r (\lambda_w + \lambda_0) \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z (\lambda_w + \lambda_0) \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0 \quad (1.1)$$

$$m \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rmSu_w) + \frac{\partial}{\partial z} (mSv_w) = 0$$

$$m \frac{\partial Sc_k}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rmSc_k u_w) + \frac{\partial}{\partial z} (mSc_k v_w) = - \frac{(1-m) \rho_R}{\rho_w} \frac{\partial a_k}{\partial t}$$

$$\lambda_i = \frac{f_i}{R\mu_i}, \quad i = w, o; \quad k = 1, 2$$

$$mSu_w = -k\lambda_w \frac{\partial p}{\partial r}, \quad mSv_w = -k_z \lambda_w \frac{\partial p}{\partial z}$$

$$m(1 - S)u_0 = -k_r \frac{f_0}{R_0 \mu_0} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad m(1 - S)v_0 = -k_z \frac{f_0}{R_0 \mu_0} \frac{\partial p}{\partial z}$$

Здесь S , p , m — водонасыщенность, давление и пористость; c_k , a_k — концентрации реагентов в воде и на скелете пористой среды; u , v , k_r , k_z — радиальные и вертикальные компоненты скорости и абсолютной проницаемости; ρ , f , μ , R — плотность, фазовая проницаемость, вязкость и фактор сопротивления; нижние индексы w , o и R относятся к водной, нефтяной фазам и скелету пористой среды.

В системе уравнений (1.1) не учитываются гравитационные капиллярные силы и диффузный перенос компонентов ввиду их слабого проявления в призабойной зоне пласта. Система уравнений замыкается следующими соотношениями: 1) равновесными изотермами массообмена $a(c)$ в наиболее общем представлении Ленгмюра

$$a_k = A_k \frac{b_k c_k}{1 + b_k c_k}$$

2) зависимостью фактора сопротивления от концентрации адсорбированных компонент, которая выбиралась в виде

$$R_i = 1 + d_{1i} a_1 + d_{2i} a_2 + d_{3i} a_1 a_2$$

где третий член учитывает процесс гелеобразования; 3) формулами для фазовых проницаемостей

$$f_w = \begin{cases} (S/(1 - S_{wr}))^n, & S > S_{wr} \\ 0, & S < S_{wr} \end{cases}, \quad f_o = \begin{cases} 0, & S > 1 - S_{or} \\ ((1 - S - S_{or})/(1 - S_{or} - S_{wr}))^p, & S_{wr} < S < 1 - S_{or} \\ 1, & S < S_{wr} \end{cases}$$

Принимается, что вязкость нефти — постоянная величина, а вязкость воды зависит лишь от концентрации полимера

$$\mu_w = \mu_{w0} + \mu_{wi} c_i$$

Согласно приведенной модели, гелеобразование происходит на поверхности скелета пористой среды в результате взаимодействия адсорбированных компонентов. Этот механизм определяется как основной в работе [5].

2. Первоначально целесообразно проанализировать решение упрощенной задачи о движении двух оторочек реагентов в однородной пористой среде, насыщенной водой. В этом случае система (1.1) упрощается и допускает точное аналитическое решение

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} + \frac{V}{\pi h m} \frac{\partial c_k}{\partial r^2} = - \frac{\rho_R (1 - m)}{\rho_w m} \frac{\partial a_k}{\partial t}$$

$$V = (2\pi h r m u_w)_c, \quad k = 1, 2$$

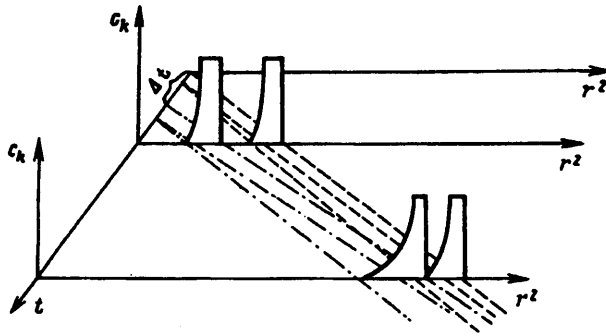
где V — поток жидкости через скважину, h — мощность пласта.

Эти уравнения допускают решения в виде простых волн [6]

$$\frac{\partial r^2}{\partial t} = \frac{V}{\pi h m} \left(1 + \frac{\rho_r (1 - m)}{\rho_w m} \frac{\partial a_k}{\partial c_k} \right)^{-1}, \quad \frac{dc_k}{dt} = 0$$

и в виде скачков, на которых выполняются следующие балансовые соотношения:

$$D = \frac{V}{\pi h m} \left(1 + \frac{\rho_r (1 - m)}{\rho_w m} \frac{a_k^+ - a_k^-}{c_k^+ - c_k^-} \right)^{-1}, \quad k = 1, 2$$



Фиг. 1

где D — радиальная скорость разрыва, индексы плюс и минус обозначают значения параметров до и после разрыва.

При последовательной закачке оторочек двух реагентов при нулевой адсорбции они будут двигаться с одинаковой скоростью — скоростью конвективного течения воды — и никогда не прореагируют. Адсорбция компонентов приводит к снижению скорости распространения оторочек. Отношение скоростей передних фронтов оторочек, которые распространяются в виде скачков, равно

$$\frac{D_1}{D_2} = \left(\frac{\rho_w m}{\rho_r (1 - m)} + \frac{a_2 (c_{20})}{c_{20}} \right) \left(\frac{\rho_w m}{\rho_r (1 - m)} + \frac{a_1 (c_{10})}{c_{10}} \right)^{-1}$$

где c_{k0} — исходная концентрация k -го реагента, подаваемого в пласт. Таким образом, для того чтобы оторочки в пласте прореагировали, необходимо, чтобы интенсивность адсорбции a_k/c_k первого компонента была больше интенсивности адсорбции второго компонента. Место и время реакции определяется формулами

$$r_*^2 = \frac{\Delta t V}{\pi h m} \left(\frac{\rho_w m}{\rho_k (1 - m)} + \frac{a_2 (c_{20})}{c_{20}} \right) \left(\frac{\rho_w m}{\rho_r (1 - m)} + \frac{a_1 (c_{10})}{c_{10}} \right)^{-1} \left(\frac{a_1 (c_{10})}{c_{10}} - \frac{a_2 (c_{20})}{c_{20}} \right)^{-1}$$

$$t_* = \Delta t \left(\frac{\rho_w m}{\rho_r (1 - m)} + \frac{a_2 (c_{20})}{c_{20}} \right) \left(\frac{a_1 (c_{10})}{c_{10}} - \frac{a_2 (c_{20})}{c_{20}} \right)^{-1}$$

где Δt — время начала закачки второй оторочки.

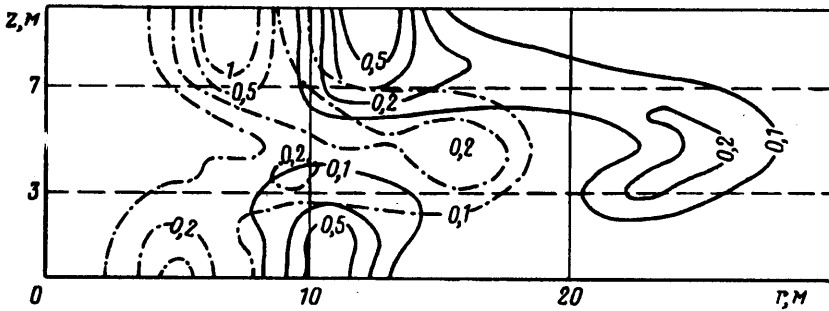
Вид решения приведен на фиг. 1, где отражена эволюция оторочек во времени. Таким образом для того, чтобы реагенты прореагировали внутри пласта, необходимо, во-первых, первой закачивать в пласт оторочку наиболее интенсивно адсорбируемого компонента; во-вторых, между оторочками реагентов закачивать промежуточную оторочку воды, причем ее размер влияет на время и место осуществления реакции.

3. Численно решалась следующая осесимметричная задача: в пласт, состоящий из трех изотропных ($k_1 = k_2$) пропластков мощностью 3, 4 и 3 м и проницаемостью 0,2, 0,5 и 0,1 мкм² соответственно, через скважину радиуса r_c подается вода до полного обводнения высокопроницаемого пропластка, затем оторочки первого, наиболее адсорбируемого компонента, воды и второго гелеобразующего компонента. В скважине и на расстоянии $r = R$ от скважины давление поддерживается постоянным и равным p_c и p_R соответственно. Значения параметров, использованных в расчетах, приведены ниже

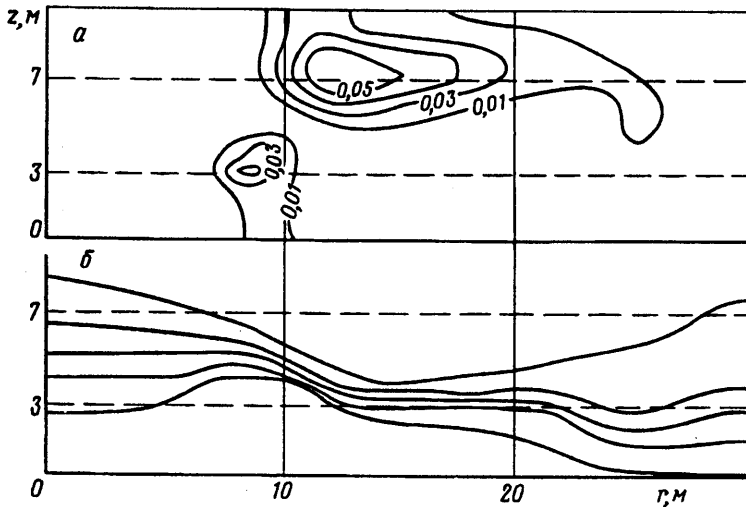
$$\mu_{w0} = 1, \mu_{w1} = 0, \mu_0 = 3 \text{ МПа} \cdot \text{с}; S_{wr} = S_{or} = 0, n = 3,5, p = 1,5.$$

$$A_1 = 0,001, b_1 = b_2 = 10^2, A_2 = 0,0001; d_{11} = d_{21} = 10^4, d_{12} = d_{22} = 2 \cdot 10^4, d_{13} = d_{23} = 10^0$$

$$m = 0,2; r_0 = 0,1, R = 30 \text{ М}; \rho_R = 2500, \rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$$



Фиг. 2



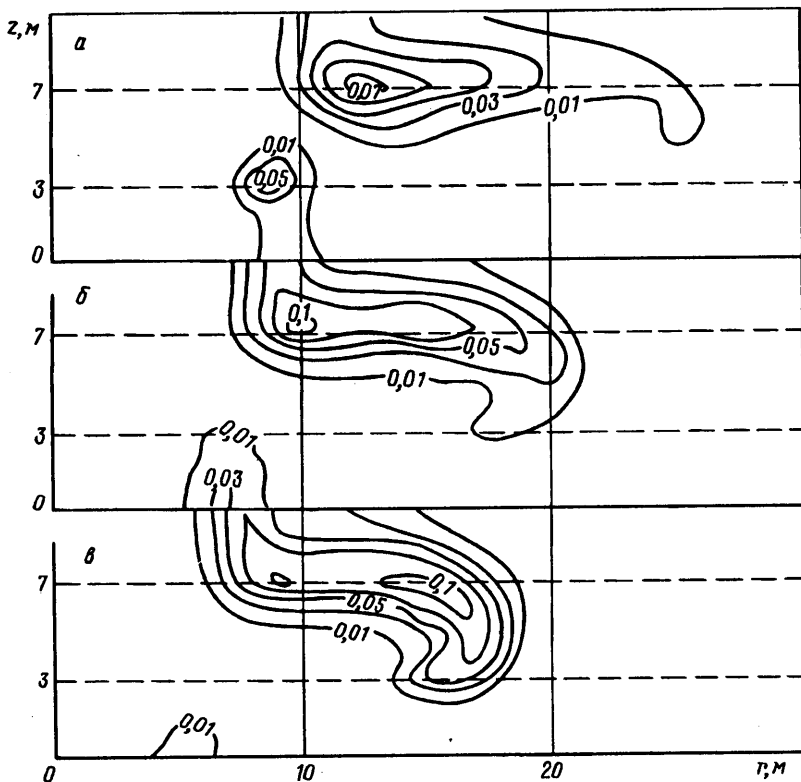
Фиг. 3

$$c_{10} = 0,005; \quad c_{20} = 0,001; \quad p_R = 23,5, \quad p_c = 28,5 \text{ МПа}$$

Численное интегрирование системы уравнений (1.1) проводилось с использованием конечно-разностных методов и основано на раздельном определении давления, водонасыщенности и концентрации компонентов на каждом временном слое. Использовалась разностная сетка с числом ячеек 32×12 . Эллиптическое уравнение для определения давления решалось методом продольно-поперечной прогонки с итерациями, гиперболические уравнения для определения водонасыщенности и концентрации компонентов — по явной схеме с дифференциальным анализатором, предложенным в [7]. Пакет программ тестировался на известных аналитических решениях.

Через 160 ч после начала закачки в пласт воды происходит полное обводнение высокопроницаемого пропластка, доля нефти в потоке на расстоянии $R = 30$ м от скважины падает с 1 до 0,2. В момент $t = 167$ ч начинается закачка первого реагента, которая длится 27 ч. За это время в пласт подается около 25% порового объема раствора первого реагента. Затем в течение 84 ч подается промежуточная оторочка воды (2 поровых объема расчетного элемента) и в течение 27 ч — оторочка второго реагента (32% порового объема).

В момент времени $t = 333$ ч вторая оторочка догоняет первую и начинается формирование гелевого барьера. Этому моменту времени соответствует фиг. 2, где приведены изоконцентрации первого (сплошные кривые) и второго реагентов (штрихпунктирные кривые). Обозначения изолиний соответствуют значениям приведенных концентраций c_k/c_{k0} . Радиальная координата отсчитывается от стенки



Фиг. 4

скважины. Штриховыми горизонтальными линиями помечены границы пропластков.

Формирование барьера завершается в момент времени $t = 500$ ч. На фиг. 3 представлены изоконцентрации произведения $a_1 \cdot a_2 \cdot 10^6$ в пористой среде (а) и линии тока (б) в этот момент времени. Эти данные иллюстрируют существенное изменение гидродинамических потоков в пласте: наиболее интенсивное течение происходит в низкопроницаемом пропластке. Однако подаваемые в пласт реагенты используются не полностью: часть оторочки первого реагента не участвует в создании барьера, а уносится потоком к выходу из пласта, т. е. при больших размерах промежуточной оторочки воды подаваемые реагенты используются менее эффективно. При малых размерах оторочки воды реагенты связываются в гелевый барьер непосредственно у скважины, забивая все сечения пласта, и фильтрационный поток в пласте практически полностью затухает.

Результаты, полученные при варьировании размеров оторочки воды от 1 до 2 поровых объемов, показали, что имеется возможность управления процессом, т. е. местом и конфигурацией размеров получаемого высоковязкого барьера. На фиг. 4 приведены для сравнения изоконцентрации $a_1 \cdot a_2 \cdot 10^6$ при размерах оторочки воды 2, 1,5, 1 порового объема расчетного элемента пласта.

Проведенный анализ показывает основные закономерности управления процессом формирования высоковязкого барьера в неоднородном пласте. С этой точки зрения новая проблема требует своего решения: проблема определения местоположения и конфигурации барьера, наиболее эффективно снижающего водонефтяное соотношение и повышающего приток нефти.

В заключение отметим, что общий подход, предложенный в работе, может быть применен и для других систем, таких, как полимердисперсные, глина-полимер и др.

Авторы благодарны Н. И. Хисамутдинову, А. Р. Латыпову за полезные обсуждения работы на стадиях ее формулировки и анализа результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григоращенко Г. И., Зайцев Ю. В., Кукин В. В. и др. Применение полимеров в добыче нефти. М.: Недра, 1978. 213 с.
2. Горбунов А. Т., Бученков Л. Н. Щелочное заводнение. М.: Недра, 1989. 161 с.
3. Hessert J. E., Fleming-III P. D. Gelled polymer technology for control of water in injection and production wells//Proc. III Tertiary Oil Recovery Conf., Wichita, Kansas, 1979. V. 4. P. 58—70.
4. Scott T., Roberts L. J., Sharpe S. R. et al. In-Situ gel calculations in complex reservoir systems using a new chemical flood simulator//SPE Res. Engng. Nov, 1987. V. 2. № 4. P. 634—646.
5. Avery M. R., Sutphen J. A. Field evaluation of production well treatments in Kansas using a crosslinked cationic polymer gel//Proc. 8th Tertiary Oil Recovery Conf., Wichita, Kansas, 1991. V. 11. P. 31—42.
6. Ентов В. М., Зазовский А. Ф. Гидродинамика процессов повышения нефтеотдачи. М.: Недра, 1989. 232 с.
7. Халимов Э. М., Леви Б. И., Дзюба В. И., Пономарев С. А. Технология повышения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1984. 271 с.

Тюмень

Поступила в редакцию
12.XI.1992