

УДК 532.546:541.12

© 2001 г. С.Н. РЕПЕТОВ, К.М. ФЕДОРОВ

## МЕТОД СЕЛЕКТИВНОЙ ЗАКАЧКИ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ В СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНЫЙ ПЛАСТ

Рассмотрен нестационарный процесс фильтрации однородной сжимаемой жидкости в слабодеформируемом слоисто-неоднородном пласте при отсутствии гидродинамической связи между пропластками. Предложен метод селективной закачки химических реагентов в высоко- или низкопроницаемые участки пласта, основанный на закачке жидкости с дебитом, который определяется интенсивностью внутрискважинных перетоков после остановки скважины. Предлагаемый метод позволяет закачать в высоко- или, наоборот, в низкопроницаемые пропластки фиксированное количество реагента, определяемое параметрами пластовой системы и режимом работы скважины.

Внутрискважинные перетоки жидкости между пластами и пропластками играют важную роль в балансе запасов нефти и газа, а также при оценке эффективности их извлечения в ходе скважинной разработки залежи. При отсутствии гидродинамической связи между пластами возможны перетоки жидкости из пласта в пласт через добывающие скважины при различных пластовых давлениях [1, 2]. При остановке добывающей или нагнетательной скважины, вскрывающей несколько пластов (пропластков), возможны нестационарные перетоки жидкости через скважину даже в случае, когда пластовые давления одинаковы. В [3] приведено экспериментальное доказательство наличия таких перетоков при остановке водозаборных скважин и приведены теоретические соображения для обоснования возможности таких перетоков.

В [4] теоретически проанализирован этот эффект в рамках исследования возможности определения свойств пластов и пропластков с помощью гидродинамических методов исследования скважин. Показано, что одновременное измерение давления в скважине и дифференциальных расходов пропластков позволяет определить фильтрационные характеристики многопластовой системы.

В данной статье разработан метод селективной закачки химических реагентов в высоко- или, наоборот, низкопроницаемые участки пласта, основанный на использовании явления перетоков жидкости между пропластками с различными фильтрационными свойствами через вскрывшую их скважину.

**1. Постановка задачи.** Рассматривается нестационарная работа скважины, вскрывшей нефтяной пласт, состоящий из нескольких гидродинамических изолированных слоев с различными фильтрационными параметрами, называемыми пропластками. Задача решается в рамках фильтрации однородной сжимаемой жидкости в слабодеформируемом пласте при отсутствии внутрислоевых межслойных перетоков. В этом случае упругий режим фильтрации в каждом пропластке описывается уравнением пьезопроводности в осесимметричном виде [5]

$$\frac{\partial P_i}{\partial t} = \chi_i \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial P_i}{\partial r} \right) \quad (1.1)$$

где  $P$  – давление,  $\chi = k/(\mu m \beta)$  – коэффициент пьезопроводности,  $m$  – пористость среды,  $k$  – коэффициент абсолютной проницаемости,  $\mu$  – вязкость пластовой жидкости,  $\beta$  – коэффициент упругоэластичности пропластка,  $t$  – время,  $r$  – радиальная координата, отсчитываемая от центра скважины, индекс  $i$  указывает номер пропластка.

Начальное распределение давления в пропластках одинаковое, соответствует работе скважины с постоянным дебитом и определяется формулой Дюпюи:

$$t = 0: P_i(r) = P_R + \frac{(R_R - P_w) \ln(r/R)}{\ln(R/r_w)}$$

где  $P_R$  – давление на контуре питания скважины,  $P_w$  – забойное давление в скважине (на уровне пласта),  $R$  – радиус контура питания скважины,  $r_w$  – радиус скважины. Пластовое давление на контуре питания в каждом пропластке считается одинаковым ( $r = R: P_i = P_R$ ) и не зависит от времени.

При нестационарной работе скважины давление на забое связано с дебитом скважины соотношением

$$t > 0, r = r_w: Q_i = \frac{2\pi k_i h_i}{\mu_i} \left( r \frac{\partial P_i}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad \sum_i Q_i = Q(t) \quad (1.2)$$

где  $Q_i$  – расход жидкости в  $i$ -ом пропластке,  $Q(t)$  – заданный закон изменения дебита скважины.

Так как мощности пластовой системы имеют порядок метров, гидростатическая добавка к давлению, связанная с разной глубиной залегания пропластков, не превышает 1 атм. Характерные перепады забойного давления и давления на контуре питания составляют 20–100 атм, поэтому в первом приближении можно пренебречь гидростатической добавкой. Учет этой добавки не представляет принципиальной сложности и не изменяет качественный характер исследуемых процессов.

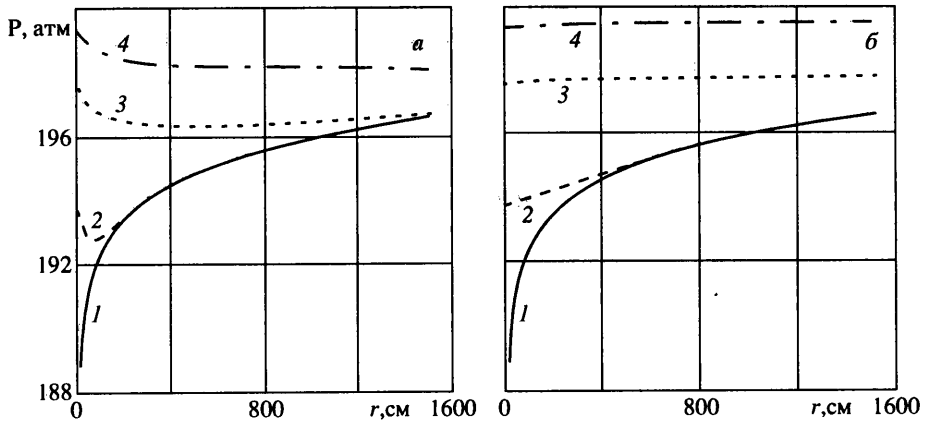
Таким образом, давление на забое скважины одинаковое (в пренебрежении гидравлической разницей давлений) для всех пропластков ( $r = r_w: P_i = P_j$ , где  $i, j$  – номера пропластков).

Решение полученной системы уравнений осуществлялось численным методом.

Для решения уравнения (1.1) применительно к каждому пропластку использована неявная разностная схема второго порядка точности по координате и первого по времени. Решение разностных уравнений осуществлялось методом прогонки. Расчеты проводились на неравномерной сетке с шагом  $dr_j = dr_0 q^j$ , где  $q$  – знаменатель геометрической прогрессии,  $dr_0$  – размер ячейки, граничащей со скважиной. Численное решение уравнения пьезопроводности тестировалось на известных аналитических решениях. При  $dr_0 = 0,1$  см и  $q = 1,135$  точность расчетов распределения давления и соответствующего расхода жидкости составила не более 0,01%.

Особенности решения задачи связаны с учетом взаимосвязанных граничных условий (1.2), которые представляют собой систему дифференциальных уравнений и не могут быть разрешены аналитически. Алгоритм решения является модифицированным методом деления отрезка пополам. Для произвольного момента времени  $t$  выбирается пробное значение давления на границе, одинаковое для всех пропластков. Затем численно решается уравнение (1.1) в каждом пропластке. После этого вычисляются итерационные значения расходов  $Q_i^v$  в каждом пропластке и суммарный расход жидкости, поступающей в скважину  $Q^v = \sum Q_i^v$ . Если абсолютное значение разности суммарного расхода жидкости из пропластков и дебита скважины меньше некоторого числа  $|Q^v - Q(t)| < \epsilon$ , значит, полученное распределение давления в пропластках является решением. В противном случае, если разность  $Q^v - Q(t)$  положительна, следующее итерационное значение  $P^{v+1}$  на границе вычисляется по формуле  $P^{v+1} = P^v - \Delta P$ . В случае отрицательного значения разности давление вычисляется как  $P^{v+1} = P^v + \Delta P$ . При смене знака  $Q^v$  значение  $\Delta P$  уменьшается вдвое. Предложенный алгоритм обеспечивает высокую скорость сходимости (решение достигается за 10–12 итераций) и выполняется на каждом шаге по времени.

Сопоставление результатов расчетов решения задачи о снижении дебита нагнетательной скважины, согласно представленной модели работы скважины в слоисто-неоднородном пласте, с полуаналитическими расчетами [4] показало полную идентичность зависимостей расходов жидкости по пропласткам от времени.



Фиг. 1. Распределение давления в пропластках после остановки добывающей скважины с течением времени: 1 – 0, 2 – 50, 3 – 500, 4 – 50000 с; а – низкопроницаемый пропласток, б – высокопроницаемый пропласток

**2. Результаты расчетов.** Рассмотрим результаты численного решения задачи об остановке добывающей скважины в пласте, состоящем из двух пропластков.

В расчетах принималось пластовое давление  $P_R = 200$  атм, до момента времени  $t = 0$  скважина работала с постоянным дебитом  $Q = -10^3$  см<sup>3</sup>/с, при котором забойное давление составляло 188,92 атм, параметры пропластков имели следующие значения:

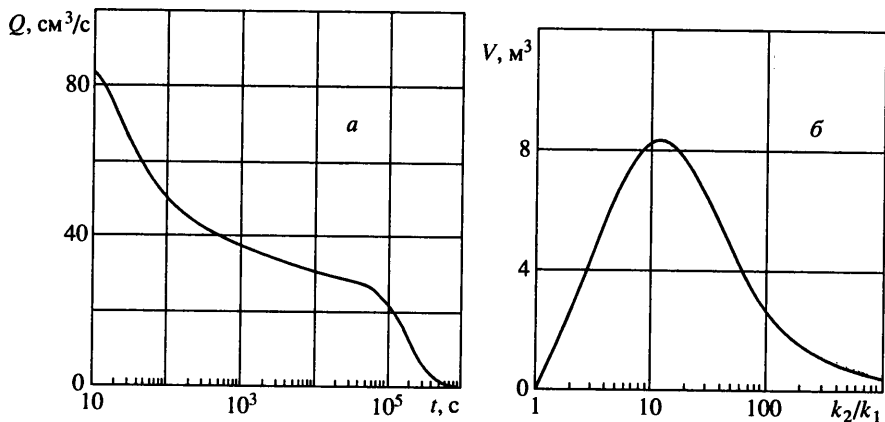
$$h_1 = h_2 = 1000 \text{ см}, m_1 = m_2 = 0,2, \beta_1 = \beta_2 = 10^{-10} \text{ см} \cdot \text{с}^2/\text{г}, \mu_1 = \mu_2 = 0,01 \text{ П}, k_1 = 10^{-10} \text{ см}^2, k_2 = 10^{-9} \text{ см}^2.$$

После остановки добывающей скважины распределение давления в пропластках начинает изменяться, причем эти изменения носят различный характер. Динамика изменения давления в пропластках приведена на фиг. 1. В начальный момент времени стационарное распределение давления (кривые 1) в обоих пропластках описывается формулой Дюпюи. Далее в высокопроницаемом пропластке распределение давления в зависимости от расстояния имеет монотонный характер. В низкопроницаемом пропластке вблизи скважины наблюдается резкое падение давления, а затем, как и в высокопроницаемом, происходит монотонное возрастание давления до значения пластового. С течением времени распределение давления в обоих пропластках стремится к постоянному значению, равному величине пластового давления.

За счет различных знаков градиента давления на стенке скважины в различных пропластках наблюдается затухающий отток жидкости из высокопроницаемого пропластка и всасывание из скважины жидкости в низкопроницаемый. Объем перетекающей таким образом жидкости из пропластка в пропласток зависит от соотношения коэффициентов гидропроводности пропластков  $k_i h_i / \mu_i$  и абсолютных значений этих коэффициентов, а также от дебита скважины до остановки.

На фиг. 2, а представлена зависимость от времени суммарного расхода жидкости, вытекающей из высокопроницаемого пропластка и попадающей в низкопроницаемый. При  $t \rightarrow 0$  значение расхода для данной задачи максимально и соответствует дебиту скважины до остановки. После остановки скважины происходит резкое падение значения расхода жидкости примерно в 4 раза за время порядка 20 мин. Далее наблюдается длительный период (десятки часов) релаксации давления и перетока жидкости. Расчеты показали, что эта зависимость имеет экспоненциальный характер при  $t > 3$  ч.

Зависимость объема жидкости, перетекающей из высокопроницаемого в низкопроницаемый пропласток за промежуток времени  $\Delta t = 2$  сут, от соотношения проницае-



Фиг. 2. Внутрискважинный переток жидкости после остановки скважины, вскрывшей пласт, состоящий из двух изолированных пропластков; *a* – зависимость расхода перетекшей жидкости от времени; *б* – зависимость объема перетекшей жидкости от соотношения  $k_2/k_1$ , при  $k_2 = 10^{-9} \text{ см}^2$

мостей  $k_2/k_1$  при  $k_2 = 10^{-9} \text{ см}^2$  имеет ярко выраженный максимум:  $V = 8,1 \cdot 10^6 \text{ см}^3$  (фиг. 2, б). При стремлении отношения проницаемостей к единице значение объема перетекшей жидкости стремится к нулю, так как в однородном пласте переток жидкости не наблюдается. С увеличением  $k_2/k_1$  величина объема перетекшей жидкости уменьшается и при  $k_2/k_1 \rightarrow \infty$  перетоки жидкости также отсутствуют, так как низкопроницаемый пропласток становится непроницаемым и не реагирует на изменение работы скважины.

При остановке нагнетательной скважины наблюдается обратное явление – отток жидкости из низкопроницаемого пропластка и всасывание из скважины жидкости в высокопроницаемый пропласток. Значения расхода перетекающей жидкости при остановке нагнетательной и добывающей скважин совпадают по модулю, но противоположны по знаку (при одинаковых параметрах пропластков и дебите жидкости до остановки). Значения объема перетекающей жидкости для нагнетательной и добывающей скважин также совпадают.

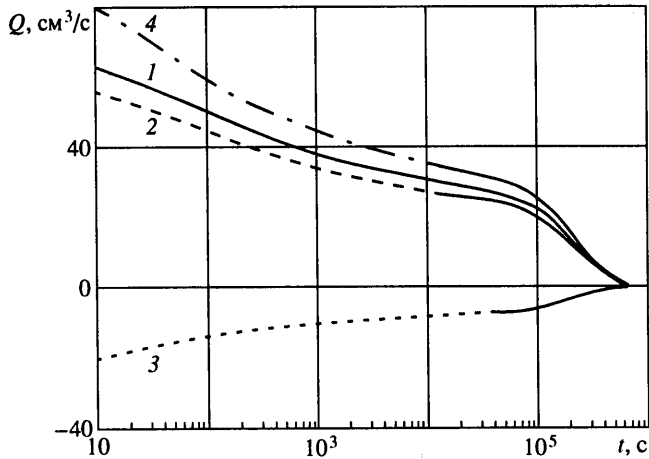
Главный вывод этого анализа – заключение о том, что характерный объем и время внутрискважинных перетоков жидкости после остановки работы скважины по порядку величин совпадают с соответствующими параметрами, применяемыми при обработках пластов различными химическими реагентами. Логично сделать предположение о возможности использования этих перетоков для селективной обработки химическими реагентами слоисто-неоднородного пласта.

Для проверки этой гипотезы решалась следующая задача. Модельный пласт состоит из двух пропластков с параметрами:

$$m_1 = m_2 = 0,2, \beta_1 = \beta_2 = 10^{-10} \text{ см} \cdot \text{с}^2/\text{г}, \mu_1 = \mu_2 = 10^{-2} \text{ П}, k_1 = 10^{-9} \text{ см}^2, k_2 = 2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2, h_1 = h_2 = 1000 \text{ см}.$$

Режим работы скважины, вскрывшей этот пласт, состоял в следующих операциях. До момента  $t = 0$  она работала как добывающая с дебитом  $Q = -1,5 \cdot 10^3 \text{ см}^3/\text{с}$ . В момент времени  $t = 0$  в скважину начинается нагнетание реагента с дебитом  $Q_{in}(t)$ , который совпадает с рассчитанной ранее интенсивностью внутрискважинного перетока. Положим для простоты, что пластовая и закачиваемая жидкости взаиморастворимы и имеют одинаковую вязкость.

Как показали расчеты, при равенстве дебита закачки жидкости и интенсивности перетока жидкости после остановки скважины вся закачиваемая жидкость попадает только в низкопроницаемый пропласток. Максимальный объем жидкости, который



Фиг. 3. Решение задачи о селективной закачке химических реагентов в добывающую скважину, вскрывшую слоисто-неоднородный пласт, состоящий из двух пропластков: 1 – интенсивность внутрискважинных перетоков при остановке скважины, 2 – темп закачки реагента, 3, 4 – расход жидкости при закачке в высоко- и низкопроницаемом пропластке

можно селективно закачать в низкопроницаемый пропласток в предлагаемом режиме, равен объему перетоков при остановке скважины и, следовательно, также определяется параметрами пропластков и начальным дебитом скважины. Для описанного модельного пласта этот объем равен  $7,7 \cdot 10^6 \text{ см}^3$  за 10 сут.

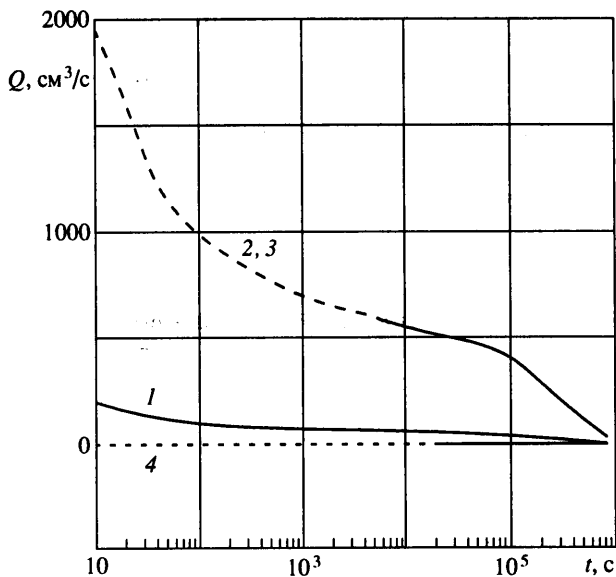
На фиг. 3 приведены расходы жидкости, закачиваемой в скважину (кривая 2) и попадающей в низкопроницаемый пропласток, и данные о внутрискважинном перетоке жидкости из решения задачи об остановке работы скважины (кривая 1). В данном случае дебит закачки равен  $Q_{in}(t) = 0,9 Q_{cr}(t)$ , где  $Q_{cr}$  – интенсивность перетока. В случае, когда темп закачки меньше соответствующей интенсивности внутрискважинного перетока, наблюдается отток пластовой жидкости из высокопроницаемого пропластка (кривая 3), смешивание ее с закачиваемой жидкостью и всасывание этой смеси в низкопроницаемый пропласток (кривая 4).

Если темп закачки больше соответствующей интенсивности перетока, то селективность не наблюдается, т.е. закачиваемая жидкость попадает как в низкопроницаемый, так и в высокопроницаемый пропластки.

Далее представлены результаты расчетов задачи о селективной закачке жидкости в высокопроницаемые пропластки. Моделировалась скважина, вскрывшая двухслойный пласт с параметрами

$$h_1 = h_2 = 300 \text{ см}, m_1 = m_2 = 0,2, \beta_1 = \beta_2 = 10^{-10} \text{ см} \cdot \text{с}^2/\text{г}, \mu_1 = \mu_2 = 10^{-2} \text{ П}, k_1 = 10^{-10} \text{ см}^2, k_2 = 10^{-9} \text{ см}^2.$$

До момента  $t = 0$  скважина работала как нагнетательная с дебитом  $Q = 3 \cdot 10^3 \text{ см}^3/\text{с}$ . При  $t = 0$  в скважину начинают нагнетать реагент с дебитом закачки  $Q_{in}(t)$ . Темп закачки выбирается равным интенсивности межслойного перетока жидкости при остановке этой скважины, умноженной на соотношение гидропроводностей пропластков (для рассматриваемого случая этот коэффициент равен 10). Из фиг. 4 видно, что в случае закачки жидкости с дебитом  $Q = Q_{in}(t)$  жидкость попадает только в высокопроницаемый пропласток. Аналогично предыдущей задаче, если темп закачки  $Q(t) < Q_{in}(t)$ , наблюдается отток пластовой жидкости из низкопроницаемого пропластка, смешивание ее с закачиваемой жидкостью и всасывание этой смеси в высо-



Фиг. 4. Решение задачи о селективной закачке химических реагентов в нагнетательную скважину, вскрывшую слоисто-неоднородный пласт, состоящий из двух пропластков: 1 — интенсивность внутрискважинных перетоков при остановке скважины, 2 — темп закачки реагента, 3, 4 — расход жидкости при закачке в высоко- и низкопроницаемом пропластке

копроницаемый пропласток. Если  $Q(t) > Q_{in}(t)$ , то закачиваемая жидкость попадает как в высокопроницаемый, так и в низкопроницаемый пропластки.

Как и предыдущем случае, максимальный объем жидкости, закачанный селективно в высокопроницаемый пропласток, зависит от параметров пропластков и начального дебита скважины. Для такого модельного пласта этот объем равен  $1,64 \cdot 10^8$  см<sup>3</sup> за 10 сут.

Таким образом, анализ внутрискважинных перетоков жидкости при остановке работы скважины позволил разработать методику использования этих перетоков для селективной закачки химических реагентов в слоисто-неоднородный пласт.

**Заключение.** Анализ внутрискважинных перетоков жидкости при остановке работы скважины показал, что характерный объем и время межслойных перетоков по порядку величин совпадают с соответствующими параметрами, характерными для обработок пластов различными химическими реагентами.

Предложен метод селективной закачки химических реагентов в высоко- или низкопроницаемые участки пластовой системы, в котором дебит закачки реагента зависит от времени и определяется интенсивностью внутрискважинных перетоков жидкости после остановки скважины. Интенсивность перетоков рассчитывается из решения вспомогательной задачи об остановке скважины. В случае добывающей скважины необходимый темп закачки реагента равен интенсивности внутрискважинных перетоков, а для нагнетательной — произведению интенсивности на соотношение гидропроводностей пропластков.

Для каждого пласта предлагаемая методика позволяет закачать фиксированное количество реагента, определяемое параметрами пласта и режимом работы до остановки скважины. Максимально возможное количество реагента, закачанного в случае низкопроницаемых пропластков, равно объему межслойных перетоков после остановки скважины, а в случае высокопроницаемых пропластков — произведению объема межслойных перетоков на соотношение гидропроводностей пропластков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дияшев Р.Н.* Совместная разработка нефтяных пластов. М.: Недра, 1984. 208 с.
2. *Modine A.D., Coats K.H., Wells M.W.* A superposition method for representing wellbore crossflow in reservoir simulation // SPE Res. Eng. 1992. № 4. P. 335–342.
3. *Юсупов К.С., Медведский Р.И., Каптелинин Н.Д.* О перетоках жидкости между пластами, вскрытыми общим фильтром одной скважины или различными нагнетательными скважинами, сообщающимися через систему водоводов // Тр. Гипротюменнефтегаза. 1971. Вып. 23. С. 128–137.
4. *Ehlig-Economides C.A., Joseph J.* A new test for determination of individual layer properties in a multilayered reservoir // SPE Formulat. Evaluat. 1987. № 9. P. 261–283.
5. *Басмиев К.С., Власов А.М., Кочина И.Н., Максимов В.М.* Подземная гидравлика. М.: Недра, 1986. 303 с.

Тюмень

Поступила в редакцию  
29.1.2001