

УДК 532.546

АНАЛИЗ ВНУТРИСКВАЖИННЫХ ПЕРЕТОКОВ ЖИДКОСТИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ РАБОТЕ СКВАЖИНЫ В СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНОМ ПЛАСТЕ

К. М. Федоров, Л. М. Кадочникова*, С. Н. Репетов

Тюменский государственный университет, 625003 Тюмень

* Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики СО РАН, 625000 Тюмень

Рассмотрен нестационарный процесс фильтрации однородной упругой жидкости в слабodeформируемом слоисто-неоднородном пласте при отсутствии гидродинамической связи между пропластками. Численно исследован эффект перетока жидкости из пропластка в пропласток через скважину при остановке работы скважины. Показано, что объем и время перетока жидкости между пропластками сопоставимы с объемом закачки и временем проведения обработки скважин химическими реагентами. Сделан вывод о возможности использования перетоков для селективной закачки химических реагентов. Предложена методика регулирования объема селективной закачки жидкости в скважину путем изменения расхода закачки.

Вертикальные перетоки жидкости между пластами и пропластками играют важную роль при оценке запасов нефти и газа, а также эффективности их добычи при скважинной разработке. При отсутствии гидродинамической связи между пластами возможны перетоки жидкости из пласта в пласт через добывающие скважины при различных пластовых давлениях [1, 2]. При остановке работы добывающей или нагнетательной скважины, вскрывающей несколько пластов (пропластков), возможны нестационарные перетоки жидкости через скважину даже в случае, когда пластовые давления одинаковы. В работе [3] экспериментально доказано наличие таких перетоков при остановке работы водозаборных скважин. Там же теоретически обоснована возможность таких перетоков. В работе [4] проведен теоретический анализ этого процесса при изучении возможности определения свойств пластов и пропластков с помощью гидродинамических методов исследования скважин. Показано, что одновременное измерение давления в скважине и дифференциальных расходов в пропластках позволяет определить фильтрационные характеристики многопластовой системы.

При эксплуатации нефтяных и газовых скважин часто возникает необходимость увеличения приемистости низкопроницаемых зон и пропластков или, наоборот, блокирования высокопроницаемых обводненных пропластков. Для этого призабойные зоны обрабатывают кислотами и гелями. При использовании данных методов основной проблемой является селективная доставка химических реагентов в высоко- или низкопроницаемые пропластки [5]. В данной работе анализируются перетоки жидкости между пропластками через скважину при ее нестационарной работе. Проведенный численный анализ показал, что объем и характерное время таких перетоков при резких изменениях расхода жидкости через скважину сопоставимы с соответствующими величинами, полученными при кислотных или гелевых обработках пласта. Исследовано влияние соотношения проницаемостей пропластков и изменения расхода жидкости на величину межпластовых внутрискважинных перетоков.

1. Постановка задачи. Рассматриваются задачи о нестационарной работе добывающей скважины, вскрывшей нефтяной пласт, состоящий из нескольких гидродинамически изолированных пропластков с различными фильтрационными параметрами. Первая задача заключается в анализе потоков жидкости в пропластках при остановке работы скважины. Процесс анализируется в рамках модели фильтрации однородной упругой жидкости в слабodeформируемом пласте. В этом случае распределение давления в каждом пропластке определяется уравнением пьезопроводности [6]

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

где P — давление; $\chi = k/(\mu m \beta)$ — коэффициент пьезопроводности; m — пористость среды; k — коэффициент абсолютной проницаемости; μ — вязкость пластовой жидкости (нефти); β — коэффициент упругоёмкости пропластка; t — время; r — радиальная координата, отсчитываемая от центра скважины; индекс i соответствует номеру пропластка.

Начальное распределение давления в пропластках соответствует работе скважины с постоянным дебитом и определяется по формуле Дюпюи

$$P_i(r) = P_r + \frac{(P_r - P_w) \ln(r/R)}{\ln(R/r_w)}, \quad t = 0,$$

где P_r — давление на контуре питания скважины (одинаковое для всех пропластков); P_w — забойное давление в скважине (на уровне пласта); R — радиус питания скважины; r_w — радиус скважины. Пластовое давление на контуре питания в каждом пропластке будем считать одинаковым: $P_i = P_r$ при $r = R$.

При остановке работы скважины суммарный дебит всех пропластков равен нулю. В этом случае давление в пропластках на забое скважины определяется следующим дифференциальным соотношением:

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

где h — мощность пропластка.

Так как мощность пластовой системы составляет порядка 10 м, то гидростатическая добавка к давлению в скважине, связанная с различной глубиной залегания пропластков, не превышает 1 атм. Перепад давления в пропластках, создаваемый насосным оборудованием, составляет 50–100 атм, поэтому в первом приближении можно пренебречь этой добавкой и считать давление в скважине во всех пропластках одинаковым. Учет добавки не представляет сложности и не приводит к изменению характера исследуемых процессов. Дополнительным граничным условием, соответствующим режиму остановки работы скважины, является равенство давлений в скважине во всех пропластках: $P_i = P_j$, где i, j — номера пропластков.

Таким образом, особенностью поставленной задачи является задание на одной из границ (на стенке скважины) взаимосвязанных значений давления и их производных. В случае двух пропластков задача сводится к классической задаче о теплопередаче в составном стержне.

Задача решалась численным методом. При решении уравнения (1.1) для каждого пропластка использовалась неявная разностная схема второго порядка точности по координате и первого по времени. Разностные уравнения решались 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. Численный метод тестировался сопоставлением с известными аналитическими решениями. При $dr_0 = 0,01$ м

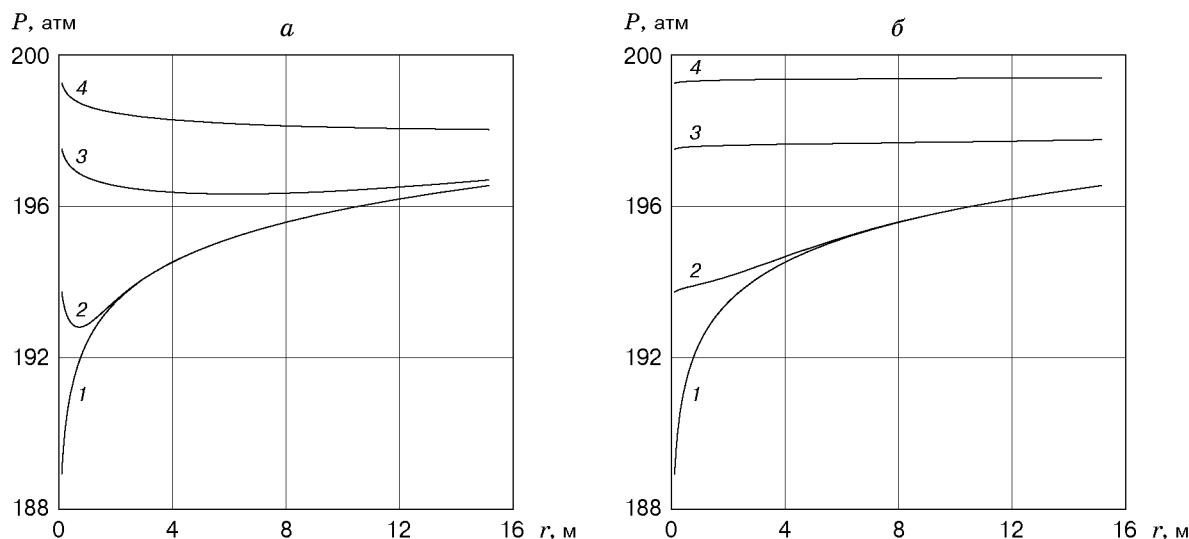


Рис. 1. Распределение давления в низкопроницаемом (*а*) и высокопроницаемом (*б*) пропластках (показана часть контура питания вблизи скважины):

1 — $t = 0$, 2 — $t = 50$ с, 3 — $t = 500$ с, 4 — $t = 50\,000$ с

и $q = 1,135$ погрешность расчетов распределения давления и суммарного расхода жидкости составила 0,01 %.

При решении задачи учитывались граничные условия (1.2), представляющие собой систему дифференциальных уравнений, которая не может быть решена аналитически. Алгоритм решения является модификацией метода деления отрезка пополам. Для произвольного момента времени t выбирается значение давления на границе, одинаковое для всех пропластков. Затем численно решается уравнение (1.1) в каждом пропластке, вычисляются итерационные значения расходов Q_i^ν в каждом пропластке и суммарный расход жидкости, поступающей в скважину: $Q^\nu = \sum Q_i^\nu$. Если абсолютное значение разности суммарного расхода жидкости и дебита скважины меньше некоторого значения ε ($|Q^\nu - Q| < \varepsilon$), то полученное распределение давления в пропластках является решением. В противном случае ($|Q^\nu - Q| > \varepsilon$), если разность $Q^\nu - Q$ положительна, итерационное значение $P^{\nu+1}$ на границе вычисляется по формуле $P^{\nu+1} = P^\nu - \Delta P$. В случае отрицательного значения разности давление вычисляется как $P^{\nu+1} = P^\nu + \Delta P$. При смене знака расхода Q^ν значение ΔP уменьшается в два раза. Предложенный алгоритм обеспечивает высокую скорость сходимости (решение достигается за 9–10 итераций) и выполняется на каждом шаге по времени.

2. Результаты расчетов. Рассмотрим результаты численного решения задачи об остановке работы добывающей скважины в пласте, состоящем из двух пропластков. В расчетах принималось пластовое давление $P_r = 200$ атм, до момента $t = 0$ скважина работала с постоянным дебитом $86,4$ м³/сут, при этом забойное давление составляло $188,92$ атм. Параметры пропластков: $h = 10$ м, $m = 0,2$, $\beta = 10^{-9}$ м · с²/кг, $\mu = 10^{-3}$ Па · с, для первого пропластка $k = 10^{-14}$ м², для второго $k = 10^{-13}$ м².

После остановки работы добывающей скважины давление в пропластках изменяется. На рис. 1 представлены результаты расчетов для части контура питания вблизи скважины. В начальный момент времени стационарное распределение давления в обоих пропластках описывается формулой Дюпюи (кривые 1). В дальнейшем в высокопроницаемом пропластке распределение давления имеет монотонный характер (рис. 1, б). В низкопроницаемом пропластке вблизи скважины наблюдается резкое падение давления, а затем, как и

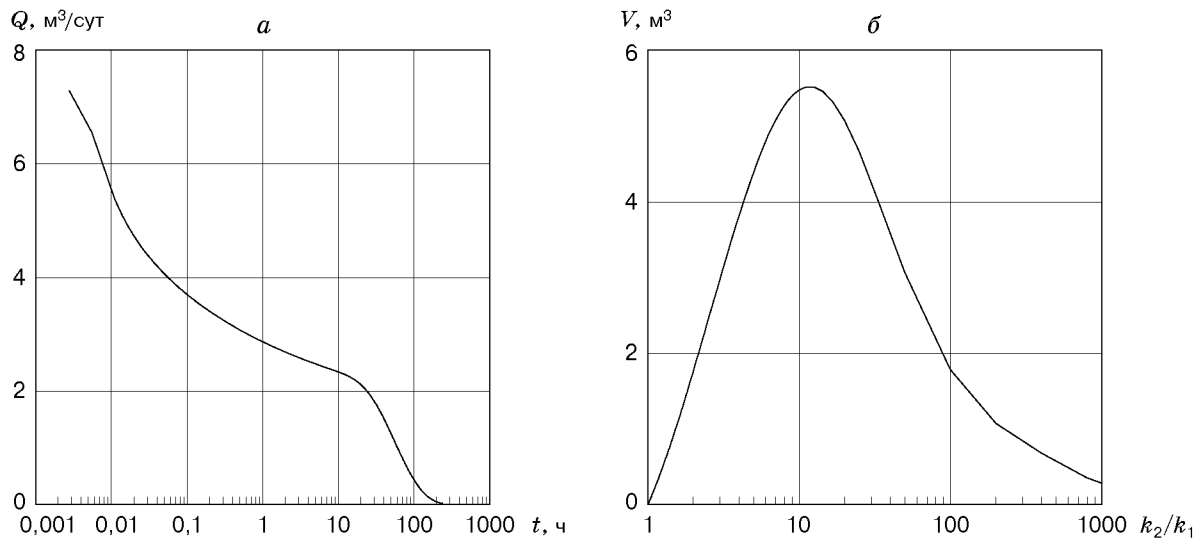


Рис. 2. Переток жидкости при остановке работы скважины, вскрывшей пласт, состоящий из двух изолированных пропластков:

а — зависимость суммарного расхода перетекшей жидкости от времени; *б* — зависимость объема перетекшей жидкости от соотношения k_2/k_1 при $k_2 = 10^{-13} \text{ м}^2 = \text{const}$

в высокопроницаемом, давление монотонно возрастает до значения пластового (рис. 1, *а*). С течением времени давление в обоих пропластках стремится к постоянному значению, равному пластовому. Из-за различия знаков градиента давления на стенке скважины в различных пропластках наблюдается затухающий отток жидкости из высокопроницаемого пропластка и всасывание из скважины жидкости в низкопроницаемый. Объем жидкости, перетекшей таким образом из пропластка в пропласток, зависит как от соотношения коэффициентов гидропроводности пропластков ($k_i h_i / \mu_i$), так и от абсолютных значений этих коэффициентов.

На рис. 2, *а* представлена зависимость суммарного расхода жидкости, перетекшей из высокопроницаемого пропластка в низкопроницаемый, от времени. При $t = 0$ расход для рассматриваемой задачи максимален и соответствует дебиту скважины до остановки ее работы. После остановки работы скважины расход жидкости резко уменьшается (примерно в четыре раза за время порядка 20 мин). Затем в течение длительного периода (десятки часов) наблюдаются релаксация давления и переток жидкости.

На рис. 2, *б* приведена зависимость объема жидкости, перетекшей из высокопроницаемого пропластка в низкопроницаемый за промежуток времени 2 сут, от соотношения коэффициентов проницаемостей k_2/k_1 при фиксированном значении $k_2 = 10^{-13} \text{ м}^2$. Кривая на рис. 2, *б* имеет ярко выраженный максимум ($V = 5,5 \text{ м}^3$) при $k_2/k_1 = 12$. При $k_2/k_1 \rightarrow 1$ $V \rightarrow 0$, так как в однородном пласте перетока жидкости не наблюдается. При $k_2/k_1 > 12$ объем перетекшей жидкости уменьшается, т. е. при $k_2/k_1 \rightarrow \infty$ переток жидкости отсутствует, так как низкопроницаемый пропласток становится непроницаемым и не реагирует на изменение работы скважины.

При остановке работы нагнетательной скважины наблюдается обратное явление — отток жидкости из низкопроницаемого пропластка и всасывание из скважины жидкости в высокопроницаемый пропласток. Расходы перетекшей жидкости при остановке работы нагнетательной и добывающей скважин совпадают по модулю, но противоположны по знаку (при одних и тех же параметрах пропластков и перепадах давления). Объемы перетекшей жидкости для нагнетательной и добывающей скважин также совпадают.

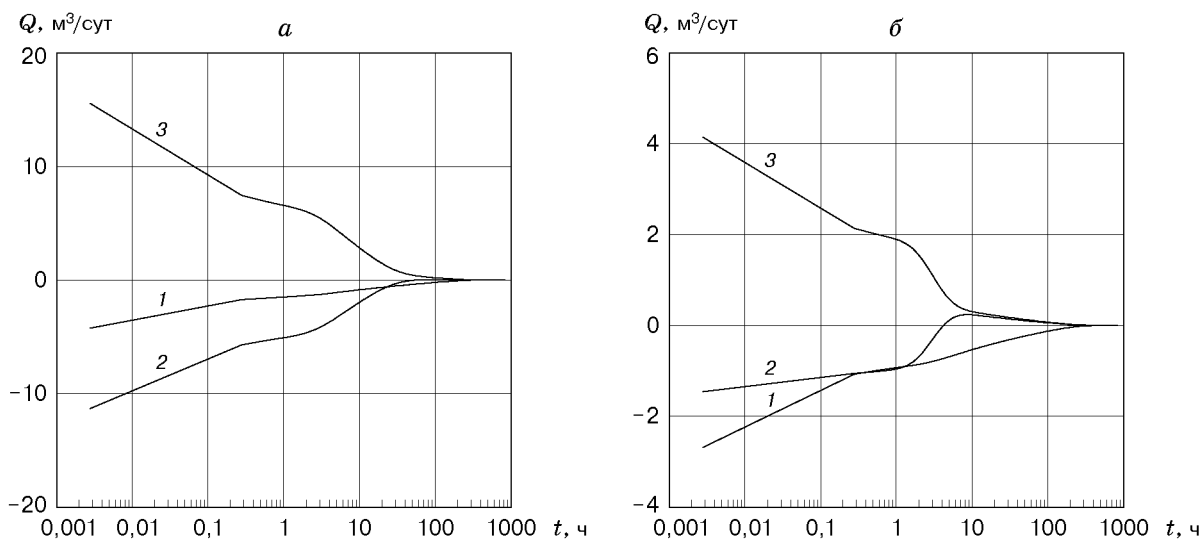


Рис. 3. Зависимость расхода перетекшей жидкости в пропластках от времени при остановке работы скважины:

a — 1 — $k_1 = 10^{-14}$ м², $V_1 = -2,9$ м³; 2 — $k_2 = 8 \cdot 10^{-14}$ м², $V_2 = -2,4$ м³; 3 — $k_3 = 10^{-12}$ м², $V_3 = 5,3$ м³; b — 1 — $k_1 = 10^{-14}$ м², $V_1 = -1,8$ м³; 2 — $k_2 = 8 \cdot 10^{-13}$ м², $V_2 = 0,6$ м³; 3 — $k_3 = 10^{-12}$ м², $V_3 = 1,2$ м³

Рассмотрим результаты численного решения задачи об остановке работы нагнетательной скважины в пласте, состоящем из трех пропластков. Параметры пропластков выбирались следующими: $h_1 = h_2 = h_3 = 3$ м, $m_1 = m_2 = m_3 = 0,2$, $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 10^{-9}$ м · с²/кг, $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 10^{-3}$ Па · с, коэффициенты проницаемости изменялись. Пластовое давление составляло 150 атм.

При остановке работы скважины наблюдается характерный переток жидкости через забой из низкопроницаемых пропластков в высокопроницаемые. Зависимости расхода перетекшей жидкости в пропластках от времени при остановке работы скважины представлены на рис. 3. Жидкость вытекает из низкопроницаемых пропластков 1 и 2 и всасывается из скважины высокопроницаемым пропластком 3 (рис. 3,а). Для условий, соответствующих рис. 3,б, при малых значениях t жидкость перетекает из низкопроницаемых пропластков 1 и 2 в высокопроницаемый пропласток 3. Примерно через 4 ч после остановки работы скважины направление перетока жидкости в пропластке 2 меняется на противоположное, причем суммарный объем перетекшей жидкости из пропластка 2 положителен. Таким образом, всасывание жидкости из скважины после остановки ее работы является селективным процессом, зависящим от проницаемости пропластков.

Ниже представлены результаты расчетов задачи об изменении расхода закачки жидкости в скважину. Рассматривался процесс закачки жидкости в нагнетательную скважину, вскрывшую трехслойный пласт с параметрами, описанными выше, и проницаемостями, равными 10^{-14} , $8 \cdot 10^{-14}$ и 10^{-12} м². На рис. 4,а представлена зависимость расхода перетекшей жидкости от времени для трех пропластков при изменении в момент времени $t = 0$ расхода закачки нагнетательной скважины от 120 до 86,4 м³/сут. В начальный период времени (до $t \approx 0,1$ ч) жидкость вытекает из низкопроницаемых пропластков и всасывается из скважины высокопроницаемым, затем все три пропластка начинают всасывать жидкость в объеме, пропорциональном их проницаемостям. Через 10 ч закачки наблюдается стационарное распределение объема закачиваемой жидкости по пропласткам.

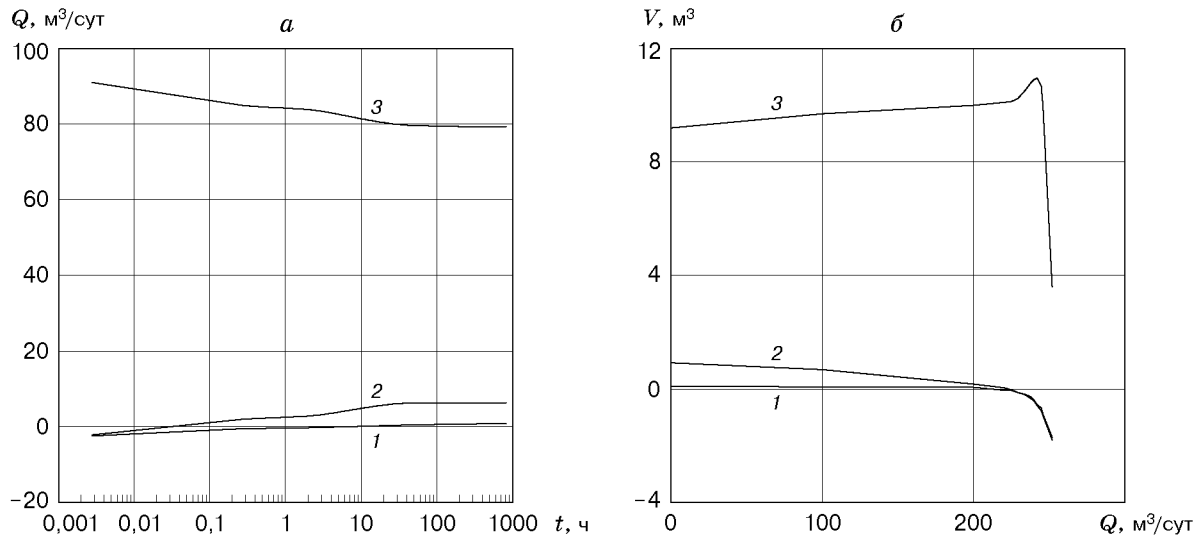


Рис. 4. Переток жидкости при изменении режима работы нагнетательной скважины, вскрывшей пласт, состоящий из трех изолированных пропластков:

а — зависимость расхода перетекшей жидкости по пропласткам от времени при изменении расхода закачки жидкости в пласт; *б* — зависимость объема перетекшей жидкости по пропласткам от разности начального и конечного расходов жидкости, закачиваемой в пласт; 1 — $k_1 = 10^{-14} \text{ м}^2$, 2 — $k_2 = 8 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$, 3 — $k_3 = 10^{-12} \text{ м}^2$

На рис. 4,б представлена интегральная зависимость объема жидкости, перетекшей за 30 сут, от разности начального и конечного расходов жидкости ΔQ . Начальный расход принимался равным $252 \text{ м}^3/\text{сут}$, конечный изменялся от $252 \text{ м}^3/\text{сут}$ до нуля. При небольшом уменьшении расхода жидкости в слоистом пласте наблюдается распределение объема жидкости по пропласткам пропорционально их гидропроводности. При большем уменьшении расхода объем жидкости, попавшей в высокопроницаемый пропласток, увеличивается, а попавшей в низкопроницаемые, наоборот, уменьшается. При расходе жидкости более $\Delta Q = 220 \text{ м}^3/\text{сут}$ вся поступающая в скважину жидкость попадает только в высокопроницаемый пропласток (селективное воздействие на высокопроницаемые зоны пласта). Анализ данных на рис. 4 позволяет сделать вывод о возможности регулирования объема жидкости, всасываемой выбранными пропластками, за счет изменения расхода.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при остановке работы скважины на забое возникают перетоки жидкости между отдельными пластами и пропластками с различными фильтрационными свойствами. При этом направление перетоков определяется режимом работы скважины до остановки: в случае остановки работы добывающей скважины происходит приток жидкости из высокопроницаемых пропластков и всасывание низкопроницаемыми, и наоборот, при остановке нагнетательной скважины жидкость вытекает из низкопроницаемых пропластков и всасывается высокопроницаемыми. Объем перетоков жидкости составляет примерно $0,5\text{--}1,0 \text{ м}^3$ на 1 м толщины пласта, а характерное время — 10–20 ч. Приведенные характеристики хорошо согласуются с соответствующими данными, полученными при обработке пластов различными химическими реагентами.

Из анализа результатов настоящей работы следует, что возможно использование внутрискважинных перетоков для селективной доставки химических реагентов (например, гелей или кислот) в низко- или высокопроницаемые части пластовой системы. Показаны принципиальные возможности управления этими перетоками.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дияшев Р. Н.** Совместная разработка нефтяных пластов. М.: Недра, 1984.
2. **Modine A. D., Coats K. H., Wells M. W.** A superposition method for representing wellbore crossflow in reservoir simulation // SPE Reservoir Engng. 1992. N 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 Format. Evaluat. 1987. N 9. P. 261–283.
5. **Федоров К. М., Телегин А. Г.** К вопросу о внедрении технологий регулирования потоков в обводненных месторождениях Западной Сибири // Нефтепромысл. дело. 1995. № 8/10. С. 30–35.
6. **Басниев К. С., Власов А. М.** Подземная гидравлика. М.: Недра, 1986.

*Поступила в редакцию 20/XII 1999 г.,
в окончательном варианте — 3/X 2000 г.*
