

УДК 532.546

© 1993 г. О. И. БОРОЗНЯК, М. Б. ПАНФИЛОВ

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СИЛЬНО НЕОДНОРОДНЫХ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ ИСТОЧНИКОВОГО ТИПА

Рассматривается процесс фильтрации слабосжимаемой жидкости в сильно неоднородном пласте, имеющем блочную структуру и по классификации относящемуся к источниковому типу. Получено аналитическое решение задачи притока флюида к скважине в ограниченном круговом пласте. На его основе исследуется влияние темпа отбора флюида на истощение пласта. Показано, что в сильно неоднородных средах возникает ряд нестационарных эффектов, не описываемых классической моделью со стационарным массообменом.

Для большинства месторождений нефти и газа характерен сложный, неоднородный по коллекторским свойствам пласт. При оценке запасов таких месторождений весь пласт условно подразделяют на коллектор и неколлектор. В качестве критерия принята величина проницаемости 0,1 мД. Однако практика разработки многих нефтяных и газовых месторождений показывает, что запасы, оцененные таким образом, оказываются обычно значительно занижены.

Проблеме установления реальных запасов газа на основе анализа разработки газовых месторождений посвящена работа [1]. В [2] рассматривается плоскопараллельная фильтрация в тонком ограниченном пласте, выше которого лежит низкопроницаемый пласт большой мощности. Показано, что при истощении такого пласта отчетливо выделяются два периода. В течение первого периода происходит истощение только первого пласта, а на второй стадии, когда нижний пласт практически полностью истощен, происходит истощение второго пласта. Отмечается, что в большинстве случаев при описании процесса фильтрации в таких средах интенсивность перетока между пластами можно считать пропорциональной разности давлений.

В работе [3] была предложена следующая классификация сильно неоднородных сред по такому критерию, как отношение пьезопроводностей блоков и коллектора или отношение их характерных времен охвата воздействию: 1) пьезооднородные среды (или среды сквозного типа), 2) среды со слабой пьезо неоднородностью (или среды источниково-сквозного типа) и 3) пьезо неоднородные среды (или среды источникового типа). Эти три типа сред различаются своими макроскопическими моделями, а также структурой течения на ячейке неоднородности, для которой характерно наличие двух составляющих: сквозного течения через блок и источникового течения в блоке равномерно во все стороны от его центра к границе.

В данной работе исследуются только среды 3-го типа, которые характеризуются следующими свойствами: а) пьезопроводность блоков (κ_2) намного ниже пьезопроводности коллектора (κ_1): $\kappa_2/\kappa_1 \ll (l/L)^2$, где l — масштаб неоднородности, L — макромасштаб пластовой системы, б) запасы флюида в блоках и коллекторе сопоставимы.

Для сред данного типа характерна чисто источниковая работа блоков. В [3] показано, что при работе блока в режиме чистого источника обменный процесс между блоками и коллектором существенно нестационарен и описывается интегродифференциальным оператором, что приводит к системе с памятью.

1. Модель процесса и среды. Рассматривая процесс фильтрации в неоднородном пласте, имеющем блочную структуру. Низкопроницаемые блоки правильной геометрии, размер которых l много меньше характерного размера пласта L равномерно распределены в пространстве. Осредненная модель фильтрации сла-

босжимаемой жидкости в пласте такого типа массообмена имеет следующий вид [3]:

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} - \kappa_1^* \Delta P_1 + \lambda \frac{\partial P_2}{\partial t} = 0 \quad (1.1)$$

$$P_2 = P_1 - \int_0^t \frac{\partial P_2}{\partial \theta} K(t - \theta) d\theta$$

$$\kappa_1^* = \frac{k_1^*}{\beta_1^* m_1 (1 - \alpha) \mu}, \quad \lambda = \frac{\beta_2^* \alpha m_2}{\beta_1^* (1 - \alpha) m_1}, \quad \beta_1^* = \beta_1 + \beta_{\rho 1}$$

Здесь индекс 1 соответствует высокопроницаемой среде (коллектор), а 2 — низкопроницаемым блокам (неколлектор), P — давление, t — время, κ_1^* и k_1^* — эффективные пьезопроводность и проницаемость коллектора, m — пористость, μ — вязкость, $\beta_1, \beta_{\rho 1}$ — коэффициенты сжимаемости жидкости и пор, α — доля объема пласта, приходящаяся на низкопроницаемые блоки, λ — отношение упругого запаса неколлектора к упругому запасу коллектора.

Система (1.1) может быть сведена к одному интегродифференциальному уравнению для P_1

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} - \kappa_1^* \Delta P_1 = -\lambda \int_0^t \frac{\partial P_1}{\partial \theta} K_*(t - \theta) d\theta, \quad -K_*(t) \equiv \frac{dK}{dt} \quad (1.2)$$

Для простоты будем считать, что блоки имеют форму шара с диаметром D . В этом случае выражение для ядра $K(t)$, определяющего обменный процесс между блоками и коллектором, записывается следующим образом:

$$K(t) = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2} \right) \exp \left(-\frac{4n^2 t}{t_*} \right), \quad t_* = \frac{D}{\pi^2 \kappa_2} \quad (1.3)$$

где κ_2 — пьезопроводность, t_* — характерное время релаксации блока.

2. Задача истощения сильно неоднородного пласта. Рассмотрим радиальное течение нефти в круговом пласте радиуса R и толщиной h к центральной скважине радиуса R_c с массовым дебитом $G(t)$ и непроницаемой границей в рамках модели (1.3)

$$\varepsilon \frac{\partial p}{\partial \tau} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = -\varepsilon \lambda \int_0^t \frac{\partial p}{\partial \theta} K_*(\tau - \theta) d\theta$$

$$p(0, r) = 1, \quad \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=1} = 0 \quad (2.1)$$

$$r \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=r_c} = \varepsilon \sigma \frac{q(\tau)}{2}$$

$$p = \frac{P}{P^*}, \quad \tau = \frac{t}{T}, \quad q = \frac{G(t)}{\langle G \rangle}$$

$$\varepsilon = \frac{\langle G \rangle \mu \beta_1^*}{k_1^* (1 - r_c^2) h \pi \rho}, \quad r = \frac{R}{R_*}, \quad \sigma = \frac{1}{\beta_1^* P^*}$$

где T — время полного истощения коллектора, $\langle G \rangle$ — средний дебит за время T , P^* — начальное пластовое давление, ρ — плотность нефти.

Здесь ε — мера интенсивности истощения пласта, всегда является малым

параметром [4]. Решение задачи (2.1) может быть получено с использованием асимптотического метода квазиравновесных возмущений [4].

По условию запасы флюида в блоках и коллекторе сопоставимы, поэтому примем, что $\lambda \sim 1$. Тогда асимптотическое разложение решения задачи (2.1) при $\varepsilon \rightarrow 0$ примет вид

$$p(\tau) = p_0(\tau) - 0,25\varepsilon\sigma q(\tau)(r^2 - 2\ln(r) + v(r_c)) \quad (2.2)$$

$$v(r_c) = \frac{0,5(r_c^4 + 2r_c^2 - 2r_c^2 \ln(r_c^2) - 3)}{(1 - r_c)^2}$$

где $p_0(\tau)$ — средневзвешенное по объему коллектора давление, которое равно

$$p_0(\tau) = 1 - \sigma Q(\tau) + \frac{\lambda}{1 + \lambda} \left[\sigma Q(\tau) + \int_0^\tau \frac{dp_0}{d\theta} K(\tau - \theta) d\theta \right] \quad (2.3)$$

$$Q(\tau) = \int_0^\tau q(\tau') d\tau'$$

где $Q(\tau)$ — доля нефти, отобранной из коллектора за время t (нефтеотдача коллектора).

Структура депрессионной воронки, описываемая вторым справа слагаемым в (2.2), оказывается такой же, как в однородном пласте [3]. Влияние неоднородности пласта проявляется в интегральной составляющей решения $p_0(\tau)$.

3. Уравнение материального баланса сильно неоднородного пласта. Соотношение (2.3) для $p_0(\tau)$ есть не что иное, как уравнение материального баланса для сильно неоднородного пласта. Для него сохраняется начальное условие $p_0(0) = 1$.

Для решения интегродифференциального уравнения Эйлера 2-го рода используем преобразование Лапласа. Для функции $p_0^*(s) = \int_0^\infty p_0(\tau) e^{-s\tau} d\tau$ получаем следующее уравнение:

$$p_0^*(s) = \frac{1}{s} - \sigma \frac{1}{1 + \lambda} Q^*(s) \frac{1}{1 - \lambda s K^*(s)/(\lambda + 1)} \quad (3.1)$$

Согласно теореме о «свертке», в пространстве оригиналов равенству (3.1) будет соответствовать уравнение

$$p_0(\tau) = 1 - \sigma \frac{1}{1 + \lambda} \int_0^\tau Q(\tau - \tau') X(\tau') d\tau'$$

и задача сводится к определению оригинала $X(\tau)$ функции-изображения

$$X^*(s) = \frac{1}{1 - \lambda s K^*(s)/(\lambda + 1)}$$

Рассмотрим (1.3). При $t \rightarrow 0$ функция $K(t)$ имеет асимптотическое представление

$$K(t) \approx 1 - \frac{12}{\pi^{1,5} \sqrt{t_*}} \sqrt{t} + \frac{12}{\pi^2 t_*} t - \dots \quad (3.2)$$

Для малых t ($t/t_* < 0,01$) в (3.2) вполне можно ограничиться первыми двумя членами ряда. Данная аппроксимация функции $K(t)$ позволяет получить аналитическое решение для $p_0(\tau)$. При постоянных темпах отбора жидкости ($Q(\tau) = \tau$) для $t < 0,01t_*$ получим

$$p_0(\tau) = 1 - \sigma\tau + \Delta p(\tau)$$

$$\Delta p(\tau) = \frac{\sigma t_*}{T \delta^2} \left(1 + \frac{\delta^2 T}{t_*} \tau - \exp\left(\frac{\delta^2 T}{t_*} \tau\right) \left(1 - \Phi\left(\sqrt{\frac{\delta^2 T}{t_*} \tau}\right) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\delta^2 T}{t_*} \tau} \right) \right), \quad \delta = \frac{6\lambda}{\pi} \quad (3.3)$$

Здесь $\Delta p(\tau)$ — добавочный член, учитывающий переток массы из низкопроницаемых блоков, $\Phi(x)$ — интеграл ошибок.

Рассмотрим поведение функции $K(t)$ при больших t . С ростом t значение каждого члена ряда (1.3) быстро уменьшается и уже при $t = 0,314t$, все члены ряда, за исключением первого, пренебрежимо малы. Поэтому в качестве аппроксимации функции $K(t)$ для $t > 0,01t$ примем

$$K(t) \approx \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-4 \frac{t}{t_*}\right) + 0,258 \exp\left(-18,547 \frac{t}{t_*}\right) \quad (3.4)$$

Здесь коэффициенты второго слагаемого определены так, чтобы приближенная кривая наилучшим образом вписывалась в (1.3).

Используя (3.4), для функции $\Delta p(\tau)$ при $t > 0,01t$ получим следующее выражение:

$$\Delta p(\tau) = \sigma \frac{\lambda}{1 + \lambda} \left(\tau - \gamma \Omega_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{\xi_1}{\gamma} \tau\right) \right) - \gamma \Omega_2 \left(1 - \exp\left(-\frac{\xi_2}{\gamma} \tau\right) \right) \right), \quad \gamma = \frac{t_*}{T(1 + \lambda)} \quad (3.5)$$

Коэффициенты $\xi_i(\lambda)$ и $\Omega_i(\lambda)$ определяются следующим образом:

$$\xi_1(\lambda) = \frac{1,832 - \lambda/(1 + \lambda) + (-1)^{i+1} \sqrt{\lambda^2/(1 + \lambda)^2 - 1,967\lambda/(1 + \lambda) + 1,397}}{0,163 + 0,022\lambda}$$

$$\Omega_i(\lambda) = \frac{(-1)^i (64,247 - 7,217(1 + \lambda) \xi_1(\lambda))}{(1 - 0,866\lambda/(1 + \lambda))^2 (1 + \lambda)^3 (\xi_1 - \xi_2) \xi_1^2}, \quad i = 1, 2$$

В общем случае для переменных отборов, если функция $q(\tau)$ является кусочно-постоянной, уравнение материального баланса для сильно неоднородных сред может быть представлено в следующем виде:

$$p_0(\tau) = 1 - \sigma Q(\tau) + \sum_{j=1}^N (q_j - q_{j-1}) \Delta p(\tau - \tau_{j-1})$$

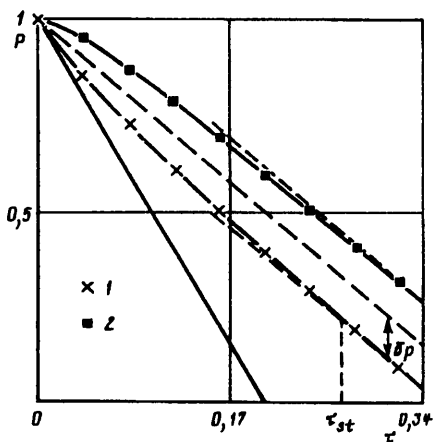
где q_j — значение функции $q(\tau)$ на интервале $\tau \in [\tau_{j-1}; \tau_j]$, N — количество временных отрезков.

4. Стадии истощения сильно неоднородного пласта. Полученные решения позволяют построить качественную картину процессов истощения сильно неоднородных пластов. С ростом τ экспоненциальные члены быстро стремятся к нулю и график функции $\Delta p(\tau)$ выходит на прямолинейную асимптоту. Приближенно время стабилизации процесса можно определить по формуле ($\xi_1 \gg \xi_2$)

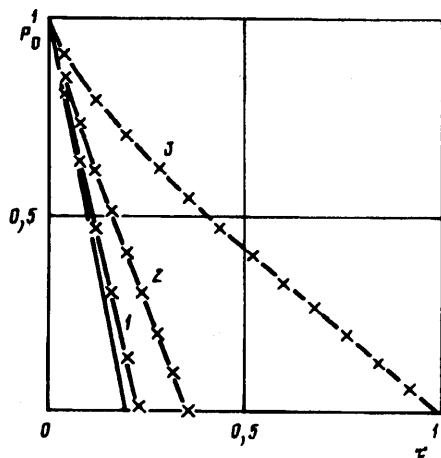
$$\tau_{st} \approx 2,996\gamma/\xi_2$$

На фиг. 1 построены характерные кривые снижения давления в коллекторе и низкопроницаемых блоках при истощении неоднородного пласта согласно (3.3), (3.5). Параметры λ и γ приняты равными 1 и 0,25 соответственно; параметр σ во всех расчетах считается равным 5. Здесь и далее на графиках тонкой сплошной линией без точек будем изображать давление в коллекторе без учета перетока флюида, а крупным штрихом — среднепластовое давление. Кривые падения давления в коллекторе и блоках соответственно обозначены 1 и 2.

Рассмотрим начальные участки кривых. При $\tau \rightarrow 0$ из-за малых объемов претекаемой жидкости темп падения давления в блоках стремится к нулю.



Фиг. 1



Фиг. 2

Кривая падения давления в коллекторе остается прямолинейной, так как влияние низкопроницаемой части пласта еще несущественно.

Далее, по мере снижения давления в коллекторе массообменный процесс усиливается. Давление в блоках начинает заметно снижаться: кривая изменения давления в коллекторе отклоняется от начального прямолинейного участка.

При $\tau = \tau_{st}$ обменный процесс между низкопроницаемыми блоками и коллектором стабилизируется и кривые изменения давления выходят на прямолинейные асимптоты. При дальнейшем истощении пласта сохраняется постоянный перепад между давлением в коллекторе и давлением в блоках. Превышение среднепластового давления над давлением в коллекторе для $\tau > \tau_{st}$ вычисляется по формуле

$$\delta p = 0,166\sigma\gamma\lambda/(1 + \lambda)$$

Таким образом, процесс истощения неоднородного пласта условно можно разбить на три периода.

В течение первого периода происходит истощение только коллектора, влияние блоков вследствие их низкой проницаемости несущественно.

Во втором периоде интенсивность обменного процесса существенно возрастает. При этом темп отбора жидкости из коллектора превышает темп поступления ее из низкопроницаемой части пласта и процесс обмена остается нестационарным.

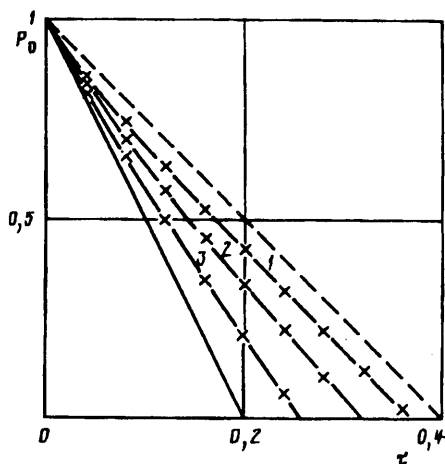
Третий период характеризуется установившимся массообменным процессом. Это период эквивалентной однородной фильтрации.

Кривые изменения давления в коллекторе для параметра $\lambda = 0,2$; 1 и 5 (кривые 1—3) и $\gamma = 0,25$ приведены на фиг. 2. Чем больше упругий запас неколлектора относительно упругого запаса коллектора, тем ниже темп падения давления в последнем.

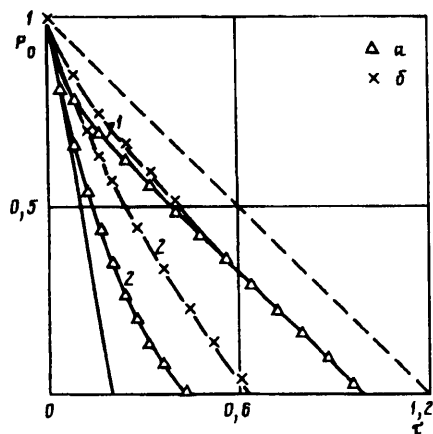
Заметим, что начальный период процесса истощения (переток из блоков пренебрежим) очень мал и для $\lambda = 0,2$ и $\gamma = 0,25$ составляет $\sim 0,05T$. С ростом λ и уменьшением γ он еще больше сокращается.

5. Истощение с постоянным темпом. Влияние параметра γ на падение давления в коллекторе показано на фиг. 3. Рассматривается случай, когда упругие запасы коллектора и блоков равны ($\lambda = 1$); кривые 1, 2 и 3 построены для значений γ , равных 0,2, 0,6 и 3 соответственно.

Если считать, что t , фиксировано, то увеличение времени полного истощения (т. е. уменьшение дебита) приводит к более равномерной выработке пласта и, следовательно, к большей нефтеотдаче. В предельном случае, когда $T \rightarrow \infty$,



Фиг. 3



Фиг. 4

влияние неоднородности не сказывается на поведении пласта и кривая падения давления в коллекторе совпадает с кривой среднепластового давления.

Для наглядности рассмотрим пример. Пусть $\lambda = 1$, а время релаксации низкопроницаемых блоков $t_c = 36$ лет. При $T = 30$ лет (кривая 2, рис. 3) общая добыча при снижении давления в коллекторе до 0,5 равняется 14% от запасов коллектора. В случае, если блоки полностью непроницаемы, будет добыто 10%. Прирост добычи за счет перетока жидкости из неколектора составляет 40%.

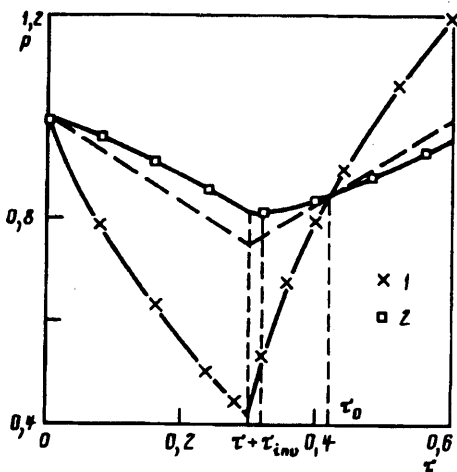
С уменьшением темпа разработки пласта (с ростом T) происходит увеличение прироста добычи и при $T = 90$ лет (кривая 1) он достигает 70%. Если же пласт разрабатывать с большим темпом, например при $T = 6$ лет (кривая 3), то при аналогичных условиях будет получено только 20% дополнительной добычи.

Следует заметить, что даже при очень низкой пьезопроводности блоков вклад неколектора в разработку пласта весьма значителен. А в случае, если $t_c \ll T$, наличие неоднородности практически не сказывается на процессе истощения пласта в целом. Так, если низкопроницаемые блоки имеют диаметр $D = 100$ м и пьезопроводность $\kappa_2 = 10^{-6}$ м²/с, а $T = 30$ лет и $\lambda = 1$, то после стабилизации обменного процесса отклонение кривой падения давления в коллекторе от среднепластового давления δp составит 22% от начального давления в пласте. Для блоков с диаметром $D = 50$ м и пьезопроводностью $\kappa_2 = 10^{-5}$ м²/с при тех же T и λ значение δp будет всего 0,5%, т. е. давление в коллекторе практически совпадает со среднепластовым.

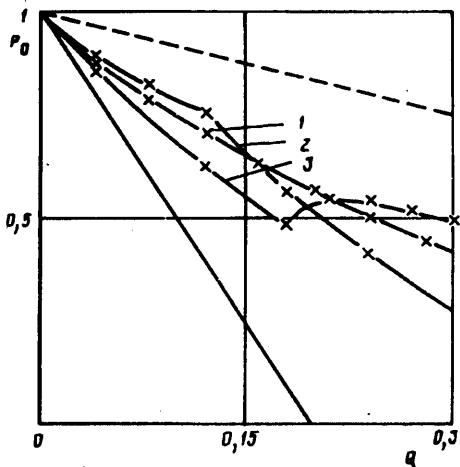
Различие между квазистационарной и нестационарной моделями показано на фиг. 4. Для первой модели характерен более продолжительный начальный период процесса истощения и более быстрая стабилизация массообменного процесса; причем время стабилизации при постоянном параметре γ не зависит от λ , тогда как для нестационарного массообмена с ростом λ период стабилизации увеличивается.

Квазистационарная модель адекватно описывает процесс истощения неоднородного пласта только при достижении установившегося массообмена. В период неустановившегося обмена различие между моделями тем существеннее, чем больше параметры λ и γ .

На фиг. 4 построены кривые истощения при $\lambda = 5$ для квазистационарной (а) и нестационарной (б) моделей, параметр γ равен 0,25 и 1 (кривые 1 и 2 соответственно). Если в первом случае незначительное различие между кривыми наблюдается лишь при $\tau < 0,63$ ($\tau_{ii} \approx 0,63$), то во втором стабилизация процесса



Фиг. 5



Фиг. 6

не происходит даже при полном снижении давления в коллекторе и на всем своем протяжении кривая истощения для квазистационарной модели проходит значительно ниже кривой нестационарной модели.

б. Истощение при переменных режимах. Характерной особенностью сильно неоднородных систем является эффект долговременной памяти: поведение давления в пласте в каждый момент времени зависит от предыстории процесса. На фиг. 5 показаны кривые изменения давления в коллекторе (1) и в низкопроницаемых блоках (2) при переменных режимах работы пласта ($\lambda = 5$, $\gamma = 1$).

При смене отбора на закачку на фоне поднимающегося давления в коллекторе давление в блоках сначала падает ($\tau < \tau_{inv}$), а затем поднимается, хотя на всем интервале (τ_+ , τ_0) остается выше давления в коллекторе. Связано это с тем, что на границе блоков образуется депрессивная воронка, в результате чего локальный перепад давления на границе блоков с коллектором и разность их средневзвешенных значений имеют различные знаки.

К моменту полной закачки всей отобранной жидкости ($\tau = 0,6$) давление в коллекторе оказывается выше своего начального значения, так как часть жидкости, первоначально находящейся в низкопроницаемых блоках, перешла в коллектор.

Наличие памяти в таких системах позволяет регулировать нефтеотдачу посредством смены технологического режима работы пласта (т. е. изменения дебита скважин).

Кривые истощения для переменных режимов работы пласта при тех же значениях λ и γ , что и на последнем рисунке, показаны на фиг. 6. Кривая 3 соответствует режиму с форсированным отбросом в начальный период (за 20% общего времени отбирается 60% добычи) и сниженным на завершающем этапе, а кривая 2 — режиму с малым темпом в начальной стадии (40% добычи отбирается за 80% общего времени) и ускоренным на завершающей.

При одинаковой добыче в первом случае давление в коллекторе оказывается выше на 16,9%, а во втором, наоборот, ниже на 33,7%, чем при постоянном режиме (кривая 1).

Обобщая полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Процесс истощения сильно неоднородных пластов включает в себя три периода. Первый период характеризуется отсутствием обменного процесса между высоко- и низкопроницаемыми участками пласта. Во втором периоде происходит включение в работу низкопроницаемой части пласта, при этом обменный процесс остается нестационарным. Для третьего периода характерен установившийся обменный процесс.

2. Модель с квазистационарным массообменом адекватно описывает процесс истощения неоднородного пласта лишь при больших временах, причем она тем хуже описывает начальный период, чем больше параметры λ и γ .

3. При постоянном режиме работы давление в коллекторе всегда остается ниже давления в низкопроницаемой среде. Для их выравнивания требуется длительный простой пласта.

4. Степень неравномерности дренирования сильно неоднородного пласта, характеризующая разностью давлений в блоках и коллекторе δp , зависит от темпа истощения. При постоянном темпе можно добиться более равномерной выработки пласта и, следовательно, большей нефтеотдачи за счет снижения темпа истощения.

5. Из-за эффекта памяти более предпочтительными для сильно неоднородных сред оказываются режимы с переменным темпом истощения. Большую нефтеотдачу можно получить за счет форсирования отборов на ранней стадии (с целью скорейшего вовлечения в дренирование блоков) и медленной последующей до-разработкой.

6. При оценке запасов сильно неоднородного пласта нефть, находящуюся в низкопроницаемой части, следует относить к категории извлекаемой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн М. А. Особенности разработки газовых залежей, приуроченных к неоднородным по проницаемости коллекторам // Газовая пром-сть. 1956. № 2. С. 7—10.
2. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра, 1972. 288 с.
3. Панфилов М. Б. Осредненная модель фильтрации в сильно неоднородных средах // Докл. АН СССР. 1990. Т. 311. № 2. С. 313—317.
4. Панфилов М. Б. Явление временного пограничного слоя в процессах истощения подземных пластов нефти и газа // Изв. АН СССР. МЖГ. 1985. № 6. С. 72—77.

Москва

Поступила в редакцию
3.IV.1992