

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОНОСНОГО ПЛАСТА

Б. А. БОГАЧЕВ

(Представлено кафедрой горючих ископаемых ТПИ)

Известно, что определение некоторых физических параметров продуктивного пласта (нефтяного, газового и водяного) по наблюдениям нестационарных режимов представляет значительную ценность по сравнению с определением их по кернам и коэффициентам продуктивности [3]. За последние годы по этому вопросу появилось большое количество опубликованных работ, касающихся главным образом методов определения указанных параметров по кривым нарастания давления в остановленных нефтяных и газовых скважинах.

Не касаясь сути каждого из существующих методов и отсылая читателя к цитируемой работе [3], изложим возможности определения некоторых физических параметров водяного продуктивного пласта с помощью интегрального метода Э. Б. Чекалюка [2], который, на наш взгляд, обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами обработки кривых нарастания давления. Кроме того, на основе указанного метода приведем разработанный нами способ определения пластового давления, который характерен тем, что не требует длительной остановки водяной скважины до полного восстановления статического уровня [1].

Имея данные роста-уровня воды в скважине во времени после прекращения в ней откачки, продолжавшейся длительный период на установившемся режиме, определение физических параметров водяного продуктивного пласта производим с помощью основной зависимости, данной Э. Б. Чекалюком [2].

$$\frac{D \cdot \ln f}{f \left[Q_0 - \frac{v(t)}{t} \right]} = \frac{\nu}{2\pi kh} \left[\ln \frac{\chi}{r^2} + \ln t \right], \quad (1)$$

где f — параметр безразмерного времени; Q_0 — дебит воды до прекращения откачки из скважины в $\text{см}^3/\text{сек}$; t — время после прекращения откачки, в сек; $v(t)$ — приток воды в скважину после прекращения откачки, в см^3 ; ν — вязкость воды в пластовых условиях в сантипуазах; k — проницаемость продуктивного пласта в дарси; h — мощность продуктивного пласта в см; χ — пьезопроводность пласта в $\text{см}^2/\text{сек}$; r — радиус совершенной скважины или приведенный радиус несовершенной, в см; D — интеграл Дюамеля.

Интеграл Дюамеля представляет собой площадь, заключенную между кривой нарастания забойного давления в остановленной сква-

жине и специальными осями координат $\Delta P(t - \tau)$, $G(f)$, где $\Delta P(t)$ — приращение забойного давления во времени в кг/см^2 ; τ — параметр интегрирования в *сек*; $G(f)$ — суммарный безразмерный приток воды в скважину при единичной депрессии, $\Delta P = 1 \text{ кг/см}^2$.

Определение величины $G(f)$ рекомендуется вести по упрощенной зависимости, предложенной нами [1]

$$G(f) = \frac{f}{0,5015 \cdot \ln f}. \quad (2)$$

Для определения физических параметров пласта необходимо построить, как минимум, две кривые нарастания забойного давления для двух значений времени, прошедших с момента прекращения откачки в координатах $\Delta P(t - \tau)$, $G(f)$, а в целях самоконтроля три и более кривых. После построения определяются интегралы Дюамеля известными приемами численного интегрирования или с помощью планиметра. Подставляя значение интегралов Дюамеля в выражение (1), находят координаты расчетных точек в системе $\ln t$, y_0 , где

$$y_0 = \frac{D \cdot \ln f}{f \left[Q_0 - \frac{v(t)}{t} \right]}. \quad (3)$$

Полученные расчетные точки в названной системе координат должны лечь на прямую линию. Уклон этой прямой i и отрезки, отсекаемые ею на осях абсцисс B и ординат A , являются вспомогательными данными, с помощью которых определяются физические параметры продуктивного пласта.

1. Проводимость пласта

$$\frac{kh}{\rho} = \frac{1}{2\pi \cdot i}, \quad \frac{\text{дарси} \cdot \text{см}}{\text{сантимуаз}}. \quad (4)$$

2. Относительная пьезопроводность пласта

$$\frac{z}{r^2} = e^{A/i}, \quad \text{сек}^{-1}. \quad (5)$$

3. Упругость пласта

$$\beta^* = \frac{e^B}{2\pi \cdot r^2 \cdot h \cdot i}, \quad \text{см}^2/\text{кг}. \quad (6)$$

Для определения статической депрессии на пласт ΔP_0 в момент остановки допустим, что скважина ко времени прекращения откачки воды работала на установившемся режиме в течение T сек. Тогда при продолжительности остановки ее, равной тому же времени T , кривая восстановления забойного давления в специальной системе координат $\Delta P(t - \tau)$, $G(f)$ будет стремиться образовать прямоугольник с названными осями. Стороны этого прямоугольника будут равны: ΔP_0 , $G(f_T)$, где $G(f_T)$ — суммарный безразмерный приток воды в скважину при $\Delta P = 1 \text{ кг/см}^2$, как функция параметра безразмерного времени, прошедшего после прекращения откачки f_T .

Имея значение ординат двух, трех и т. д. расчетных точек в системе y_0 , $\ln t$, строим прямую на плоскости в других координатах, а именно: y_0 , $\ln \frac{t}{T + t}$.

Пересечение построенной прямой с осью ординат даст значение y_0^T , для которого $\ln \frac{t}{T + t} = 0$.

Согласно принятому допущению интеграл Дюамеля для продолжительности остановки скважины T сек будет равен

$$D_T = \Delta P_0 \cdot G(f_T). \quad (7)$$

На основании соотношений (3) и (7) можно записать

$$y_0^T = \frac{\Delta P_0 \cdot G(f_T) \cdot \ln f_T}{f_T \left[Q_0 - \frac{v(T)}{T} \right]}. \quad (8)$$

В связи с малостью величины $\frac{v(T)}{T}$ ею можно пренебречь.

Тогда на основании выражений (2) и (8) статическая депрессия на пласт в момент прекращения откачки воды из скважины будет равна

$$\Delta P_0 = 0,5015 \cdot y_0^T \cdot Q_0. \quad (9)$$

Ниже приводится конкретный пример определения физических параметров водяного продуктивного пласта по данным роста уровня воды по времени после прекращения откачки в одной разведочной скважине.

Исходные данные по разведочной скважине

До прекращения откачки скважина работала на двух режимах: первый режим — $Q_1 = 770 \text{ м}^3/\text{сут.}$ в течение $T_1 = 15$ сут.; второй режим — $Q_2 = 1150 \text{ м}^3/\text{сут.}$, $T_2 = 25$ сут. через спущенные $2 \frac{1}{2}''$ фонтанные трубы. Эксплуатационная колонна $12 \frac{3}{4}''$ при толщине стенок труб $\Delta = 12 \text{ мм.}$ В момент прекращения откачки дебит скважины $Q_0 = 1150 \text{ м}^3/\text{сут} = 13300 \text{ см}^3/\text{сек}$, при динамическом уровне $h_g = 58,03 \text{ м.}$ Скважина, совершенная по степени и характеру вскрытия продуктивного пласта, глубина забоя $H = 300 \text{ м}$, диаметр скважины по долоту $15 \frac{3}{4}''$, радиус скважины $r = 20 \text{ см}$, мощность продуктивной части $h = 20 \text{ м}$, температура забоя $t_3 = 22^\circ\text{C}$; вязкость воды в пластовых условиях $\mu = 0,97$ сантипуаз, вода слабоминерализована; удельный вес ее равен $\gamma = 1 \text{ г/см}^3$.

Данные замера роста уровня воды в скважине, производившиеся электроуровнемером, и некоторая их обработка помещены в таблицу 1.

По данным графы 5 табл. 1 строились кривые в координатах $\Delta P(t - \tau)$, $G(f)$ для четырех различных значений времени, прошедших после прекращения откачки воды из скважины (рис. 1). Кривые 1, 2, 3 и 4 построены соответственно для $t_1 = 9000 \text{ сек}$, $t_2 = 12600 \text{ сек}$, $t_3 = 16200 \text{ сек}$ и $t_4 = 19800 \text{ сек}$. При этом время $t_4 = 19800 \text{ сек}$ распределялось на $f = 19800$ единиц параметра безразмерного времени. После производства численного интегрирования интегралы Дюамеля оказались равными: $D_1 = 3240$; $D_2 = 4520$; $D_3 = 5730$; $D_4 = 7010 \text{ кг/см}^2$.

Притоки воды в скважины за соответствующие промежутки времени определялись из выражения

$$v(t) = \frac{\pi}{4} \cdot \Delta h (D_s^2 - d_1^2 - d_2^2),$$

где D_s — внутренний диаметр эксплуатационной колонны, в см; d_1 и d_2 — соответственно внутренний и наружный диаметры фонтанных труб, в см. Затем определялись координаты четырех расчетных точек в системе $y_0, \ln t$.

1. Первая точка

$$y_0^I = \frac{3240 \cdot \ln 9000}{9000 \left[13300 - \frac{1369000}{9000} \right]} = 0,000249.$$

2. Вторая точка

$$y_0^{II} = \frac{4520 \cdot \ln 12600}{12600 \left[13300 - \frac{1382500}{12600} \right]} = 0,0002565.$$

3. Третья точка

$$y_0^{III} = \frac{5730 \cdot \ln 16200}{16200 \left[13300 - \frac{1402000}{16200} \right]} = 0,00026.$$

4. Четвертая точка

$$y_0^{IV} = \frac{7010 \cdot \ln 19800}{19800 \left[13300 - \frac{1421000}{19800} \right]} = 0,0002645.$$

По известным координатам четырех расчетных точек строим прямую на плоскости в системе $y_0, \ln t$. Уклон прямой $i = 0,0000196$;

Т а б л и ц а

| № п.п. | Время после прекращения откачки, сек | Уровень воды от устья, м | Приращение уровня, м | Приращение давления на забой, кг/см ² | Приток воды после прекращения откачки, см ³ |
|--------|--------------------------------------|--------------------------|----------------------|--|--|
| 0 | 0 | 58,03 | 0,00 | 0,00 | — |
| 1 | 240 | 54,70 | 4,33 | 0,433 | — |
| 2 | 300 | 51,00 | 7,03 | 0,703 | — |
| 3 | 360 | 48,40 | 9,63 | 0,963 | — |
| 4 | 420 | 47,05 | 10,98 | 1,098 | — |
| 5 | 720 | 45,90 | 12,13 | 1,213 | — |
| 6 | 1020 | 43,15 | 14,88 | 1,488 | — |
| 7 | 1320 | 42,25 | 15,78 | 1,578 | — |
| 8 | 1920 | 41,40 | 16,63 | 1,663 | — |
| 9 | 2520 | 40,90 | 17,13 | 1,713 | — |
| 10 | 3120 | 40,52 | 17,51 | 1,751 | — |
| 11 | 4920 | 39,85 | 18,18 | 1,818 | — |
| 12 | 7200 | 39,22 | 18,81 | 1,881 | — |
| 13 | 9000 | 38,90 | 19,13 | 1,913 | 1,3690 |
| 14 | 12600 | 38,28 | 19,75 | 1,975 | 1,3825 |
| 15 | 16200 | 38,00 | 20,03 | 2,003 | 1,4020 |
| 16 | 19800 | 37,73 | 20,30 | 2,030 | 1,4210 |

отрезки, отсекаемые на осях координат, равны $A = 0,000073$, $B = 3,72$ (рис. 2).

Определим физические параметры водяного продуктивного пласта согласно соотношениям (4), (5) и (6).

1. Проводимость пласта

$$\frac{kh}{\mu} = \frac{10^6}{2\pi \cdot 19,6} = 8120 \text{ д} \cdot \text{см/снз}.$$

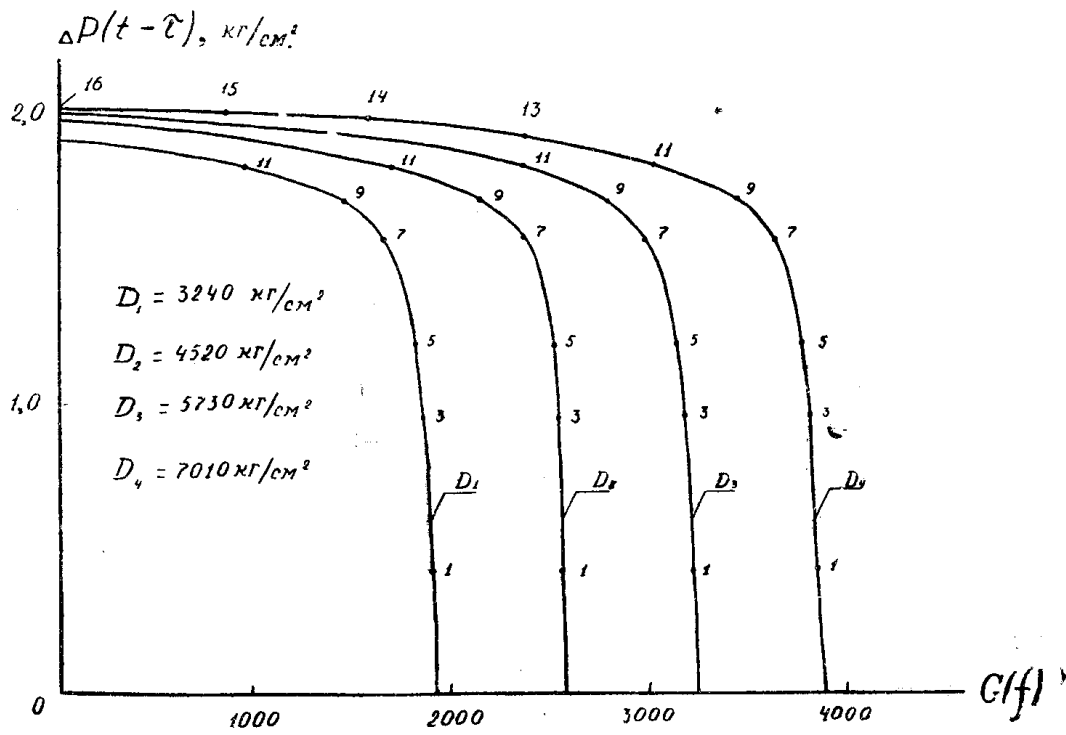


Рис. 1.

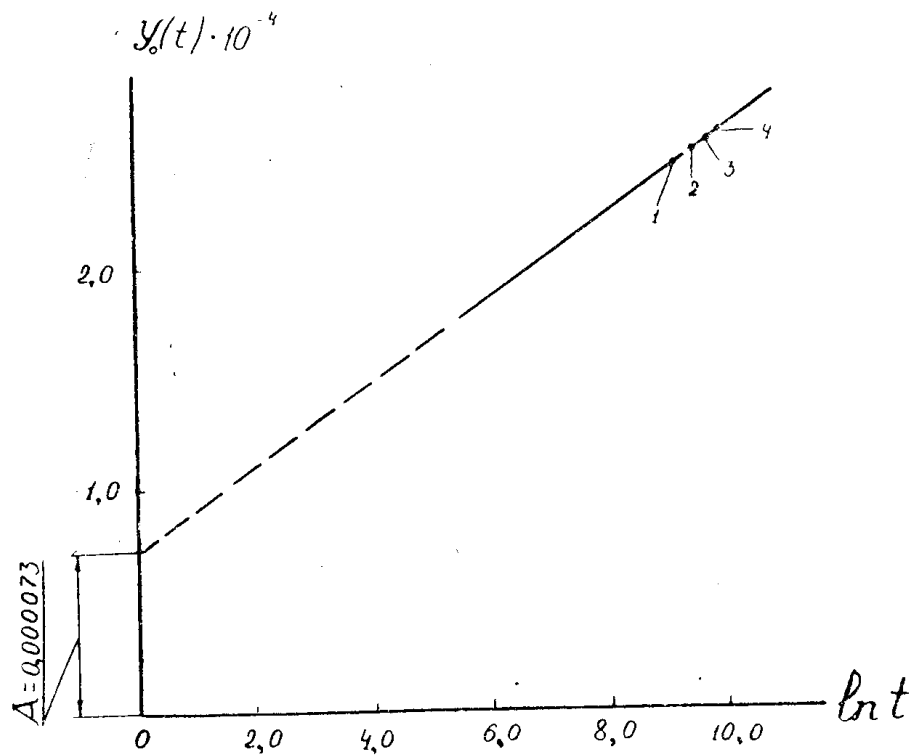


Рис. 2.

2. Проницаемость пласта

$$k = \frac{8120 \cdot 0,97}{2000} = 3,94 \text{ дарси.}$$

3. Относительная пьезопроводность

$$\frac{\alpha}{r^2} = e^{3,72} = \sim 41,5 \text{ сек}^{-1}.$$

4. Пьезопроводность пласта

$$\alpha = 41,5 \cdot (20)^2 = 16600 \text{ см}^2/\text{сек.}$$

5. Упругоёмкость пласта

$$\beta^* = \frac{10^6 \cdot e^{-3,72}}{2\pi \cdot (20)^2 \cdot 19,6 \cdot 2000} \cong 2,44 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{кг.}$$

6. Радиус влияния скважины за время работы на двух режимах

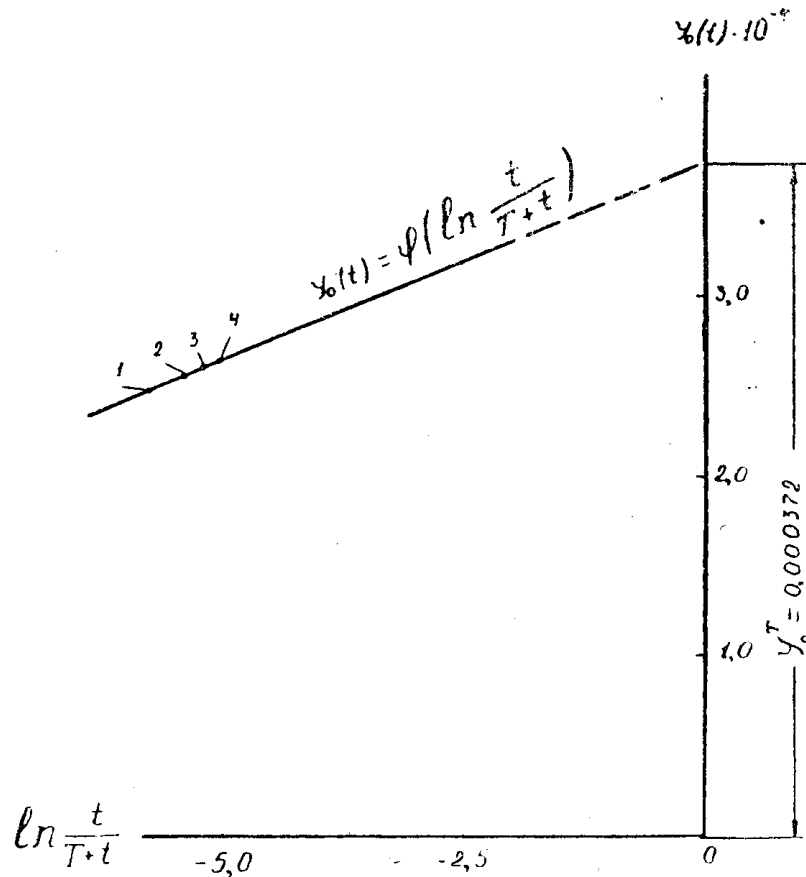


Рис. 3.

до прекращения откачки определится из учета приведенного времени, которое будет равно

$$T_{\text{пр.}} = \frac{Q_1 \cdot T_1 + Q_2 \cdot T_2}{Q_2} \cong 35 \text{ суток.}$$

Тогда радиус влияния скважины

$$R = r \sqrt{\pi \cdot \frac{\alpha}{r^2} \cdot T_{\text{пр.}}} \cong 3,97 \cdot 10^5 \text{ см.}$$

Для определения статической депрессии на пласт в момент прекращения откачки строим прямую на плоскости в координатах

$$y_0, \ln \frac{t}{T+t}.$$

При

$$\ln \frac{t}{T+t} = 0, y_0^T = 0,000372.$$

Согласно выражению (9) статическая депрессия будет равна:

$$\Delta P_0 = 0,5015 \cdot 13300 \cdot 3,72^{-4} \cong 2,5 \text{ кг/см}^2.$$

Тогда пластовое давление определится из выражения

$$\begin{aligned} P_{\text{пл.}} &= \frac{(H - h_d)}{10} \cdot \gamma + \Delta P_0 = \\ &= \frac{300 - 58,03}{10} \cdot 1,0 + 2,5 \cong 26,7 \text{ кг/см}^2. \end{aligned}$$

Любопытно отметить, что коэффициенты продуктивности скважины для призабойной зоны и осредненной по продуктивному пласту, определенные соответственно по данным исследования и по бегиту и депрессии в момент прекращения откачки, почти равны между собой.

Продуктивность призабойной зоны

$$k_3 = \frac{2\pi kh}{\mu \cdot \ln \frac{R}{r}} = \frac{2\pi \cdot 8120}{\ln \frac{3,97 \cdot 10^5}{20}} = 5160 \text{ см}^5/\text{кг} \cdot \text{сек.}$$

Продуктивность, осредненная по пласту,

$$k_c = \frac{Q_0}{\Delta P_0} = \frac{13300}{2,5} = 5320 \text{ см}^5/\text{кг} \cdot \text{сек.}$$

Последние расчеты показывают, что продуктивный водяной пласт является однородным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богачев Б. А. Известия вузов, Нефть и газ, № 10, 1961.
2. Чекалюк Э. Б. Нефтяное хозяйство, № 11, 1958.
3. Щелкачев В. Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. Гостоптехиздат, 1960.