Доклады Академии Наук СССР
1952. Том LXXXIV, № 5

ГИДРАВЛИКА

Н. С. ПИСКУНОВ

О ПЕРЕДВИЖЕНИИ КОНТУРА НЕФТЕНОСНОСТИ И ПАДЕНИИ ДАВЛЕНИЯ В ПЛАСТЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КРУПНЫХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 19 IV 1952)

В данной работе излагается метод определения давления в неограниченном пласте и передвижения контура нефтеносности при проектировании разработки крупных нефтяных месторождений с большим числом эксплуатационных и нагнетательных скважин.

1. Пусть имеем прямолинейную цепочку эксплуатационных скважин, расположенную на отрезке AB. Пусть q — объемный (в пластовых условиях) дебит нефти на единицу длины цепочки. Тогда падение давления в точке $M(x, y)$, лежащей на продолжении отрезка AB, в любой момент времени t дается формулой

$$\Delta p = Aq\left\{b\left[-\mathrm{Ei}\left(-\frac{b^2}{4\varkappa t}\right)\right] - a\left[-\mathrm{Ei}\left(-\frac{a^2}{4\varkappa t}\right)\right]\right\} + \sqrt{\pi}\sqrt{4\varkappa t}\left[\Phi\left(\frac{b}{\sqrt{4\varkappa t}}\right) - \Phi\left(\frac{a}{\sqrt{4\varkappa t}}\right)\right], \tag{1}$$

где a и b — расстояния от исследуемой точки до концов цепочки; $\mathrm{Ei}(-x) = -\int\limits_x^\infty \frac{e^{-u}}{u}\,du$ — интегральная экспоненциальная функция; $\Phi(x)$ — интеграл вероятностей; $A = \mu / 4\pi k b^*$; μ — вязкость; k — проницаемость; b^* — мощность пласта; $\varkappa$ — коэффициент пьезопроводности. Точность формулы (1) проверялась для случая $a = 1200$ м, $b = 17\,200$ м. Ошибка за время до 10 лет порядка 1—2%.

Если точка $M(x, y)$ не лежит на цепочке, то падение давления определяется по формуле:

$$\Delta p = A\int\limits_a^b\int\limits_0^t \frac{q}{t-\tau}\, e^{-\frac{h^2+l^2}{4\varkappa(t-\tau)}}\, d\tau\, dl, \tag{2}$$

где h — длина перпендикуляра, опущенного из точки M на направление прямой AB; a и b — расстояния от основания перпендикуляра до точек A и B.

Формулы (1) и (2) получаются соответствующим преобразованием решения теплового уравнения.

2. Пусть точка $N(x, t)$ лежит на водо-нефтяном контуре. Составляющие скорости данной точки v_1 и v_2 в направлениях, параллельном и перпендикулярном отрезку AB, вызванной работой цепочки скважин, даются формулами:

$$v_1 = Bq\left[\mathrm{Ei}\left(-\frac{R_2^2}{4\varkappa t}\right) - \mathrm{Ei}\left(-\frac{R_1^2}{4\varkappa t}\right)\right], \tag{3}$$

$$v_2 = 2Bqhe^{-h^2/4\varkappa t}\int\limits_a^b \frac{1}{z^2+h^2}\, e^{-z^2/4\varkappa t}\, dz, \tag{4}$$

где $B = \frac{k}{\mu m_1} A$; m_1 — эффективная пористость; $R_1^2 = a^2 + h^2$; $R_2^2 = b^2 + h^2$.

3. Из формулы (4) непосредственно следует выражение для скорости, вызванной работой единичной скважины:

$$v = 2B \frac{\bar{q}}{h} e^{-h^2/4\varkappa t} \sigma, \tag{5}$$

где $\bar{q}$ — дебит скважины; h — расстояние исследуемой точки до скважины; σ — коэффициент, приближенно учитывающий различие вязкости нефти μ_1 и воды μ_2, определенный на основании результатов В. Н. Щелкачева ([1]):

$$\sigma = \frac{\mu_1 \ln (R_к / r_0)}{\mu_1 \ln (h / r_0) + \mu_2 \ln (R_к / h)}; \tag{6}$$

$R_к$ — расстояние до некоторого условного контура, это расстояние практически мало влияет на величину. Вычисления показывают, что при $h > 300$ м σ практически мало отличается от 1. Если имеется определенное число эксплуатационных и нагнетательных скважин, то по формуле (5) вычисляем вектор скорости, вызванной работой каждой из этих скважин, и, следовательно, определяем скорость перемещения любой точки водо-нефтяного контура при работе всей системы скважин. Отметим, что вычисления по формулам (3) и (4) дают нужную точность.

Если скважины расположены на некоторой кривой, то эту кривую представляем в виде ломаной. На месторождении это и имеет место. По формулам (3), (4) и (5) определяем составляющие скорости, вызванные работой отдельных цепочек и отдельных (лежащих близко к исследуемой точке) скважин, и суммируем эти составляющие. Так же поступаем при определении падения давления, вызванного работой системы цепочек.

4. Пусть q — объемный дебит в пластовых условиях с единицы площади, представляющей часть кругового кольца. Тогда падение давления в центре сектора определяется по формуле

$$\Delta p = Aq\pi\alpha \left\{\left[4\varkappa t e^{-R_1^2/4\varkappa t} + R_1^2 \operatorname{Ei}\left(-\frac{R_1^2}{4\varkappa t}\right)\right] - \left[4\varkappa t e^{-R_2^2/4\varkappa t} + R_2^2 \operatorname{Ei}\left(-\frac{R_2^2}{4\varkappa t}\right)\right]\right\}, \tag{7}$$

где R_1 и R_2 — внутренний и внешний радиусы кольца; α — дуга в радианах. Точность этого метода проверялась; она оказалась вполне допустимой.

5. Составляющие скорости перемещения контура нефтеносности, вызванные работой указанной системы скважин, даются формулами:

$$v_x = 2Bq \sqrt{\pi\varkappa t} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \left[\Phi\left(\frac{R_2}{2\sqrt{\varkappa t}}\right) - \Phi\left(\frac{R_1}{2\sqrt{\varkappa t}}\right)\right], \tag{8}$$

$$v_y = 2Bq \sqrt{\pi\varkappa t} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \left[\Phi\left(\frac{R_2}{2\sqrt{\varkappa t}}\right) - \Phi\left(\frac{R_1}{2\sqrt{\varkappa t}}\right)\right], \tag{9}$$

где θ_1 и θ_2 — углы, образованные радиусами R_1 и R_2 с осью Ox. Движущаяся точка водо-нефтяного контура принята за начало координаты.

Если скважины занимают некоторую произвольную область, то покрываем ее соответствующим числом секторов. Определяем составляющие скорости данной точки контура, вызванные работой скважин каждого сектора, и, суммируя, находим скорость данной точки. Аналогичным образом поступаем при определении давления.

Точность метода проверялась; она оказалась практически вполне допустимой.

Поступило
4 III 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] В. Н. Щелкачев и Б. Б. Лапук, Подземная гидравлика, 1949.