УДК 532.546

Восстановление давления в скважине за счет фильтрации жидкости из окружающей пористой среды после ее «вакуумирования»

И. Г. Хусаинов, Р. М. Хафизов

Стерлитамакская государственная педагогическая академия, Стерлитамак

Аннотация. Рассмотрена задача о восстановлении давления в «вакуумированной» скважине, окруженной пористой и проницаемой средой, насыщенной жидкостью. Получены интегральное уравнение, описывающее исследуемый процесс, зависимости времени полувосстановления давления в скважине от коллекторских характеристик окружающей пористой среды, а также от значения высоты открытого участка скважины.

Ключевые слова: восстановление давления, пористая среда, фильтрация жидкости, коллекторские характеристики

1 Введение

В данной работе исследуется зависимость времени полувосстановления давления в «вакуумированной» скважине от коэффициента проницаемости окружающей пористой среды, а также от значения высоты открытого участка скважины. Под «вакуумированием» здесь понимается резкое заполнение скважины газовой фазой под низким давлением на порядок и более раз меньшим, чем давление жидкости в окружающей пористой среде. Этого можно добиться, например, с помощью разрыва спущенного в скважину пустотелого контейнера с мембраной, находящегося под атмосферным давлением. В отличие от процесса имплозии, при котором для разрыва мембраны создается избыточное давление внутри скважины путем закачки продавочной жидкости [1], при «вакуумировании» оболочка контейнера разрывается с помощью небольшого взрывного устройства направленного действия. За счет того, что общий объем контейнера намного больше, чем суммарный объем жидкости внутри скважины, ударная волна в этом случае не возникает.

2 Математическая модель

Пусть в исходном состоянии ($t < 0$) давление жидкости во всем пористом пласте вокруг скважины, находящейся в неограниченном пласте, постоянно и равно p'_0. Рассмотрим процесс восстановления давления в скважине до значения p'_0, когда в момент времени $t = 0$ в ней устанавливается начальное давление $p_0, (p_0 \leq p'_0)$.

При описании процесса восстановления давления примем следующие допущения: внутри скважины давление однородно, фазовые переходы отсутствуют, масса газа внутри скважины остается неизменной. Исследуемый участок скважины состоит из двух частей: обсаженной (закрытой) и открытой. Торцы исследуемого участка и боковая поверхность обсаженной части непроницаемы, а поверхность открытой части проницаема. Длина проницаемого участка скважины значительно больше ее радиуса.

Напишем закон сохранения массы жидкости M внутри цилиндрической полости (скважины):

$$\frac{dM}{dt} = -S\rho_l \left. v\right|_{r=a}, \quad M = \pi a^2 \left(h_{cl} + h_{op}\right)\rho, \quad S = 2\pi a h_{op}, \tag{1}$$

где S — площадь боковой поверхности полости, через которую происходит фильтрация жидкости; ρ_l — плотность жидкости, v — скорость фильтрации жидкости через стенки полости; a — радиус полости; h_{cl} и h_{op} — высота, соответственно, обсаженного и открытого участков скважины; ρ — средняя плотность жидкости внутри полости, которая определяется по формуле $\rho = \rho_l(1 - \alpha_g)$; α_{g0} — объемная доля газа в полости ($\alpha_g = h_g/(h_{cl}+h_{op})$; h_g — длина участка скважины, занятой только газовой фазой.

Уравнение состояния жидкости, находящейся в скважине и в пористой среде, примем в виде:

$$p = p_0 + C_l^2 \left(\rho_l - \rho_{l0}\right), \tag{2}$$

где C_l — скорость звука в жидкости; ρ_{l0} — начальная плотность жидкости. Газ будем считать калорически совершенным, и его поведение подчиняется политропическому закону:

$$\alpha_g = \alpha_{g0}(p_0/p)^{1/\gamma}, \quad \left(\alpha_{g0} = h_{g0}/(h_{cl} + h_{op})\right), \tag{3}$$

где γ — показатель политропы.

Для описания притока жидкости в скважину используем закон Дарси:

$$v' = -\frac{k}{\mu_l}\frac{\partial p'}{\partial r}, \quad a < r < \infty, \tag{4}$$

где v' и p' — скорость фильтрации и давление жидкости в пористой среде; k — коэффициент проницаемости пористой среды; μ_l — динамическая вязкость жидкости.

Плоскорадиальная фильтрация жидкости в пористой среде вокруг скважины описывается уравнением пьезопроводности [2]:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = \kappa \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial p'}{\partial r}\right), \quad a < r < \infty, \quad \left(\kappa = \frac{k\rho_{l0}C_l^2}{m\mu_l}\right), \tag{5}$$

где m — коэффициент пористости среды. Начальное и граничные условия для уравнений (4) и (5) могут быть записаны в виде:

$$p' = p_0', \quad (t = 0,\ r > a), \tag{6}$$

$$p' = p(t),\ v' = v(t > 0,\ r = a),\ p' = p_0',\ (t > 0,\ r \to \infty), \tag{7}$$

где $p(t)$ — текущее давление в скважине. Так как плотность жидкости слабо зависит от давления $(\rho_l - \rho_{l0} \ll \rho_l)$, то в правой части уравнения (1) изменением плотности жидкости будем пренебрегать, полагая $\rho_l = \rho_{l0}$. Интегрируя уравнение (1) по времени от 0 до t получим:

$$\rho_l(1-\alpha_g) - \rho_{l0}(1-\alpha_{g0}) = -\frac{2\eta}{a}\rho_{l0}\int\limits_0^t v|_{r=a}dt', \quad \left(\eta = \frac{h_{op}}{h_{cl}+h_{op}}\right). \tag{8}$$

Далее, учитывая уравнения состояния и закон Дарси, из (8) получим уравнение, описывающее зависимость давления в скважине от интенсивности фильтрации жидкости через ее стенку:

$$\alpha_{g0}\left(\left(\frac{p_0}{p}\right)^{1/\gamma} - 1\right) - \frac{p-p_0}{\rho_{l0}C_l^2}\left(1 - \alpha_{g0}\left(\frac{p_0}{p}\right)^{1/\gamma}\right) = -\frac{2\eta k}{a\mu_l}\int\limits_0^t \left.\frac{\partial p'}{\partial r}\right|_{r=a} dt'. \tag{9}$$

Давление жидкости в пористой среде вокруг скважины определим на основе уравнения пьезопроводности (5). Решение этого уравнения, полученного с помощью принципа Дюгамеля при начальном и граничных условиях (6) и (7), имеет вид:

$$\begin{gathered}
p' - p_0' = \int\limits_0^t \frac{\partial U(r, t-t')}{\partial t}\left(p\left(t'\right) - p_0'\right)dt', \\
U(r,t) = 1 + \frac{2}{\pi}\int\limits_0^\infty \exp\left(-\frac{z^2 t}{t_a}\right)\frac{J_0\left(\frac{zr}{a}\right)Y_0(z) - J_0(z)Y_0\left(\frac{zr}{a}\right)}{J_0^2(z)+Y_0^2(z)}\frac{dz}{z}, \\
\left(t_a = a^2/\kappa\right),
\end{gathered} \tag{10}$$

где $J_0(z)$ и $Y_0(z)$ — функции Бесселя и Неймана нулевого порядка. Здесь функция $U(r,t)$ является решением уравнения (7) с постоянными граничными условиями: $p' = 1$, $(r = a)$, $p' = 0$, $(r \to \infty)$ и нулевым начальным условием: $p' = 0$, $(t = 0)$ [3].

После подстановки (10) в (9) и некоторых преобразований, получаем нелинейное интегральное уравнение, описывающее эволюцию давления в скважине после «вакуумирования»:

$$\alpha_{g0}\left(\left(\frac{p_0}{p}\right)^{1/\gamma} - 1\right) - \frac{p - p_0}{\rho_{l0}C_l^2}\left(1 - \alpha_{g0}\left(\frac{p_0}{p}\right)^{1/\gamma}\right) =$$
$$= \frac{k\eta}{a^2\mu_l}\int\limits_0^t \varphi\left(\frac{t-t'}{t_a}\right)\left(p(t') - p_0'\right)dt', \;\; \varphi(S) = \frac{8}{\pi^2}\int\limits_0^\infty \frac{\exp(-Sz^2)}{J_0^2(z) + Y_0^2(z)}\frac{dz}{z}. \qquad (11)$$

На Рис. 1 представлены кривые восстановления безразмерного давления $\Delta P = (p - p_0)/(p_0' - p_0)$ в скважине при различных значениях высоты открытого участка скважины h_{op}. Значения параметров скважины, пористой среды, жидкости и газа следующие: $a = 0.1$ м, $m = 0.1$, $h_{cl} = 100$ м, $k = 10^{-12}$ м^2, $p_0' = 10$ МПа, $p_0 = 1$ МПа, $\rho_{l0} = 1000$ кг/м^3, $C_l = 1500$ м/с, $\mu_l = 0.001$ Па·с, $\gamma = 1.4$, $\alpha_{g0} = 0.95$. Если специально не оговорено, то и в последующих численных примерах для параметров системы скважина — пористая среда будут использованы эти же значения. Линии 1, 2 и 3 соответствуют значениям $h_{op} = 80$ м, 60 м и 40 м. Точки C_1, C_2 и C_3 — это точки полувосстановления давления соответствующие кривым 1, 2 и 3, а t_{p1}, t_{p2} и t_{p3} и — времена, соответствующие этим точкам. На Рис. 2 представлены кривые восстановления безразмерного давления ΔP в скважине при различных значениях коэффициента проницаемости k. Линии 1, 2 и 3 соответствуют значениям коэффициента проницаемости $k = 10^{-12}$ м^2, $2 \cdot 10^{-13}$ м^2, 10^{-13} м^2, а значение высоты открытого участка $h_{op} = 60$ м. Анализ кривых показал, что при увеличении величины проницаемости k на порядок, значение времени t_p, соответствующее точке полувосстановления давления, уменьшается также на порядок, то есть $t_p \sim 1/k$. Рис. 3 иллюстрируют зависимости времени t_p, соответствующей точке полувосстановления давления $p(t)$, от коэффициента проницаемости k при различных значениях высоты открытого участка скважины h_{op}. Цифры 1, 2 и 3 на линиях соответствуют значениям $h_{op} = 80$ м, 60 м и 40 м.

3 Заключение

В данной работе построена зависимость времени, соответствующей точке полувосстановления давления в «вакуумированной» скважине, от коэффициента проницаемости, по которой, при известных значениях пара-

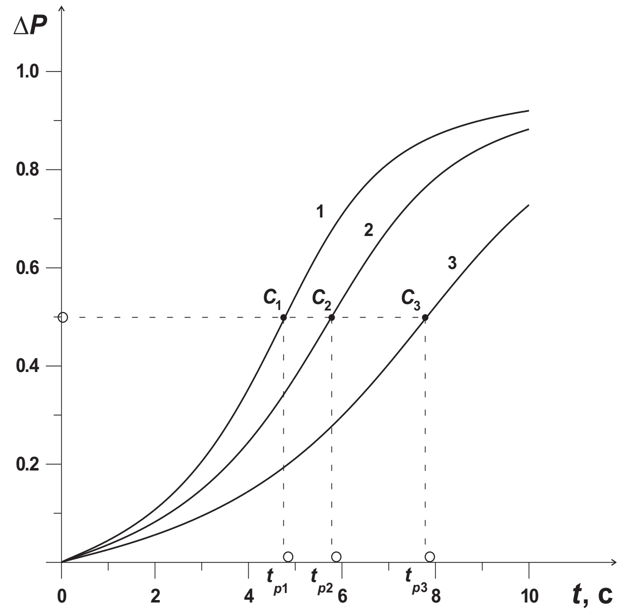

Рис. 1. Кривые восстановления безразмерного давления ΔP в скважине после «вакуумирования» при различных значениях высоты открытого участка h_{op}

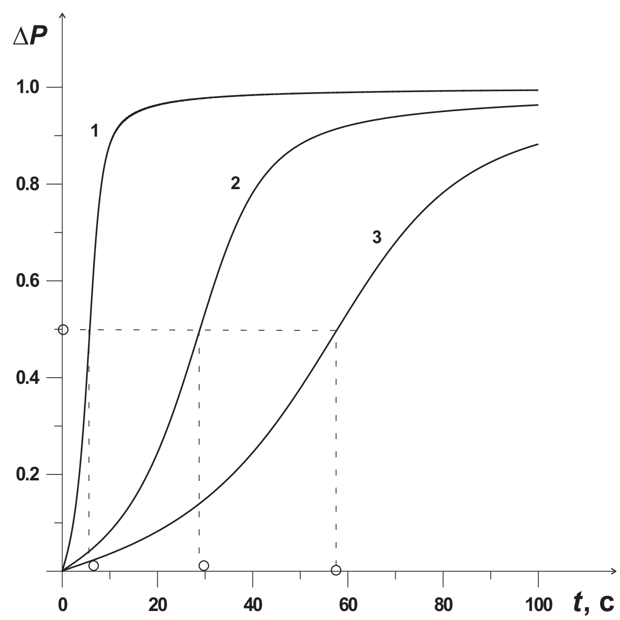

Рис. 2. Кривые восстановления безразмерного давления ΔP в скважине при различных значениях коэффициента проницаемости k

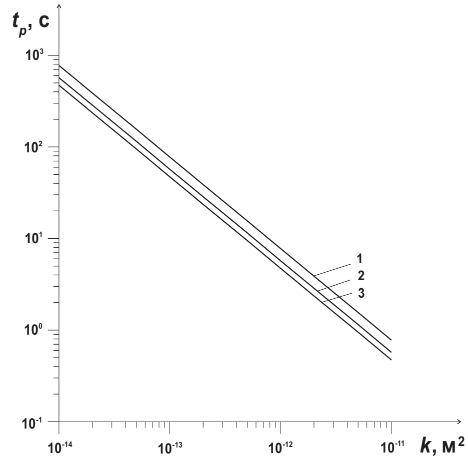

Рис. 3. Зависимости времени восстановления давления от коэффициента проницаемости при различных значениях высоты открытого участка скважины

метров скважины, можно судить о коэффициенте проницаемости породы вокруг скважины. Показано, что изменяя значения высоты открытого участка скважины, можно добиваться, чтобы время, соответствующее точке полу-восстановления давления в скважине, находилась в пределах удобных с точки зрения технической реализации этого способа на практике.

Список литературы

[1] Попов А. А. Имплозия в процессах нефтедобычи. М.: Недра, 1996. 186 с.

[2] Басниев К. С., Кочина И. Н., Максимов В. М. Подземная гидромеханика. М.: Недра, 1993. 416 с.

[3] Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.