



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):

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

где  $S$  — площадь боковой поверхности полости, через которую происходит фильтрация жидкости;  $\rho_l$  — плотность жидкости,  $v$  — скорость фильтрации жидкости через стенки полости;  $a$  — радиус полости;  $h_{cl}$  и  $h_{op}$  — высота, соответственно, обсаженного и открытого участков скважины;  $\rho$  — средняя плотность жидкости внутри полости, которая определяется по формуле  $\rho = \rho_l(1 - \alpha_g)$ ;  $\alpha_{g0}$  — 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:

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

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

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

где  $\gamma$  — показатель политропы.

Для описания притока жидкости в скважину используем закон Дарси:

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

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

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

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

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

$$p' = p'_0, \quad (t = 0, r > a), \quad (6)$$

$$p' = p(t), \quad v' = v(t > 0, r = a), \quad p' = p'_0, \quad (t > 0, r \rightarrow \infty), \quad (7)$$

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:

$$\rho_l(1 - \alpha_g) - \rho_{l0}(1 - \alpha_{g0}) = -\frac{2\eta}{a} \rho_{l0} \int_0^t v|_{r=a} dt', \quad \left( \eta = \frac{h_{op}}{h_{cl} + h_{op}} \right). \quad (8)$$

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

$$\alpha_{g0} \left( \left( \frac{p_0}{p} \right)^{1/\gamma} - 1 \right) - \frac{p - p_0}{\rho_{l0} C_l^2} \left( 1 - \alpha_{g0} \left( \frac{p_0}{p} \right)^{1/\gamma} \right) = -\frac{2\eta k}{a \mu_l} \int_0^t \frac{\partial p'}{\partial r} \Big|_{r=a} dt'. \quad (9)$$

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:

$$p' - p'_0 = \int_0^t \frac{\partial U(r, t - t')}{\partial t} (p(t') - p'_0) dt',$$

$$U(r, t) = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{z^2 t}{t_a}\right) \frac{J_0\left(\frac{zr}{a}\right) Y_0(z) - J_0(z) Y_0\left(\frac{zr}{a}\right)}{J_0^2(z) + Y_0^2(z)} \frac{dz}{z}, \quad (10)$$

$$(t_a = a^2/\kappa),$$

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:  $p' = 1$ , ( $r = a$ ),  $p' = 0$ , ( $r \rightarrow \infty$ ) 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»:

$$\alpha_{g0} \left( \left( \frac{p_0}{p} \right)^{1/\gamma} - 1 \right) - \frac{p - p_0}{\rho_{l0} C_l^2} \left( 1 - \alpha_{g0} \left( \frac{p_0}{p} \right)^{1/\gamma} \right) = \frac{k\eta}{a^2 \mu_l} \int_0^t \varphi \left( \frac{t - t'}{t_a} \right) (p(t') - p'_0) dt', \quad \varphi(S) = \frac{8}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{\exp(-Sz^2)}{J_0^2(z) + Y_0^2(z)} \frac{dz}{z}. \quad (11)$$

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<sup>2</sup>,  $p'_0 = 10$  МПа,  $p_0 = 1$  МПа,  $\rho_{l0} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_l = 1500$  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  $\Delta P$  в скважине при различных значениях коэффициента проницаемости  $k$ . Линии 1, 2 и 3 соответствуют значениям коэффициента проницаемости  $k = 10^{-12}$  м<sup>2</sup>,  $2 \cdot 10^{-13}$  м<sup>2</sup>,  $10^{-13}$  м<sup>2</sup>, а значение высоты открытого участка скважины  $h_{op} = 60$  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 ко-

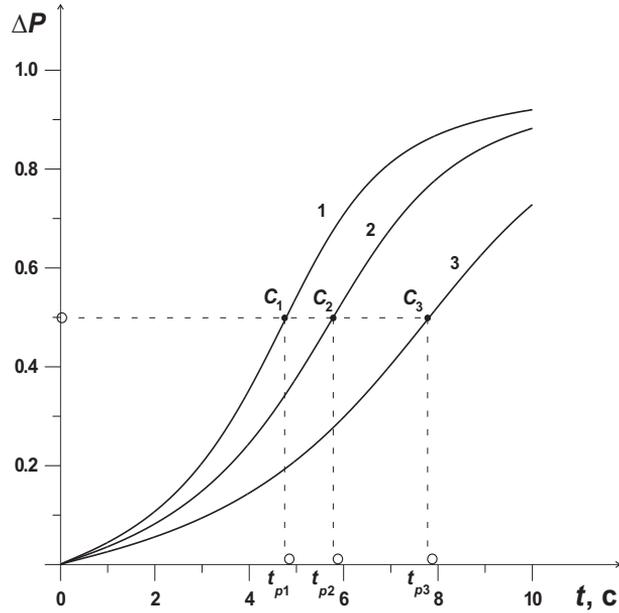


Рис. 1. Кривые восстановления безразмерного давления  $\Delta P$  в скважине после «вакуумирования» при различных значениях высоты открытого участка  $h_{op}$

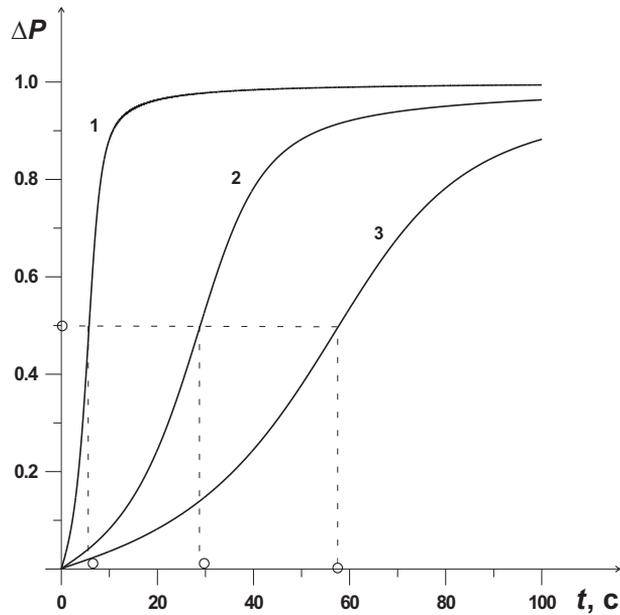


Рис. 2. Кривые восстановления безразмерного давления  $\Delta P$  в скважине при различных значениях коэффициента проницаемости  $k$

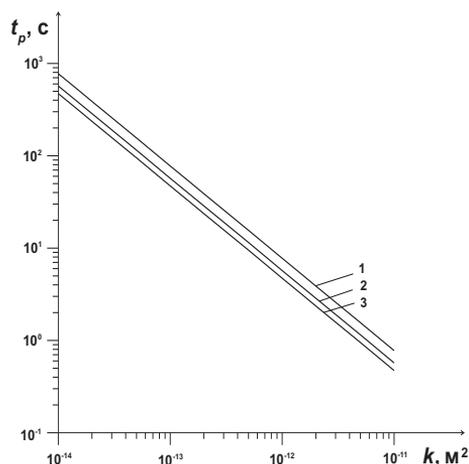


Рис. 3. Зависимости времени восстановления давления от коэффициента проницаемости при различных значениях высоты открытого участка скважины

эффицента проницаемости, по которой, при известных значениях параметров 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.