

## ДИНАМИКА РЕЛАКСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В ПОЛОСТИ С ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ СТЕНКАМИ ПОСЛЕ ЕЕ ОПРЕССОВКИ

Хусаинов И.Г.

*Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», Республика Башкортостан (453103, г. Стерлитамак, проспект Ленина, 49), e-mail: ivt30@mail.ru.*

В работе исследуется динамика релаксации давления в полости формы трещины, окруженной насыщенной жидкостью пористой и проницаемой средой, после ее опрессовки. Математическая постановка задачи включает уравнение сохранения массы жидкости внутри полости. Фильтрация газа в окружающую среду отсутствует, считается, что газ находится в специальном контейнере. Для определения скорости фильтрации жидкости из полости в окружающую пористую среду используется закон Дарси. Поле давления вокруг полости описывается с помощью уравнения пьезопроводности. Сжимаемость жидкости, находящейся в полости и в пористой среде, учитывается в акустическом приближении. Газ считается калорически совершенным, и его поведение описывается с помощью политропического закона. Получено интегральное уравнение, описывающее релаксацию давления в полости. Интегральное уравнение решается численным методом. Исследована зависимость динамики восстановления давления от параметров пористой среды. Установлено, что зависимость времени релаксации давления от коэффициентов проницаемости и пористости является обратно пропорциональной, а от начального объемного содержания газа является прямой квадратичной.

Ключевые слова: акустическая волна, перфорированная скважина, перфорационные каналы.

## DYNAMICS OF THE RELAXATION OF PRESSURE IN THE CAVITY WITH PLAINLY-PARALLEL WALLS AFTER IT PRESSURE TESTS

Khusainov I.G.

*Sterlitamak branch "Bashkir state university", Republic of Bashkortostan (453103, Sterlitamak, Lenin Avenue, 49), e-mail: ivt30@mail.ru.*

In paper dynamics of a relaxation of pressure in a cavity of the form of the crack surrounded by the saturated liquid by the porous and nontight environment, after it pressure tests is researched. Mathematical statement of a problem includes the equation of preservation of weight of a liquid inside of a cavity. The filtration of gas in an environment is absent, it is considered, that gas is in the special container. For definition of speed of a filtration of a liquid from a cavity in surrounding porous environment use Darcy's law. The field of pressure around of a cavity is described by means of the equation piezoconduction. Compressibility of the liquid which are being a cavity and in the porous environment, is considered in acoustic approximation. Gas is considered calorifically perfect and its behaviour is described by means of the polytropical law. The integrated equation describing a relaxation of pressure in a cavity is received. The integrated equation is solved a numerical method. Dependence of dynamics of restoration of pressure on parameters of the porous environment is researched. It is installed, that dependence of time of a relaxation of pressure on factors of permeability and porosity is back-proportional, and from the initial volumetric contents of gas is a straight line square-law.

Keywords: acoustic sounding, perforated wellbore, perforating tunnels.

Для исследования коллекторских характеристик призабойной зоны пластов используются различные гидродинамические, геофизические, термогидродинамические методы. В работе для оценки коллекторских характеристик пористой среды, окружающей полость формы трещины, используется метод опрессовки. Метод заключается в следующем: в полости, частично содержащей жидкость и частично газ, резко повышается давление за счет дополнительного введения газа. Далее исследуется динамика релаксации давления за счет фильтрации жидкости в окружающую пористую среду. Темп релаксации давления зависит от коллекторских характеристик окружающей пористой породы. Поэтому по времени релаксации давления можно судить, например, о величине коэффициента проницаемости породы вокруг

полости.

В [10; 14] метод опрессовки используется для оценки коллекторских характеристик пористой среды, насыщенной газом. Использование волн давления с целью нагрева и очистки призабойной зоны, а также исследование нефтяных скважин рассмотрено в [4; 6-8; 16]. Процесс распространения импульса давления в пористой среде, насыщенной газом, исследуется в [2; 9; 11; 12]. Колебательные процессы, происходящие в неньютоновских жидкостях, исследуются в [1; 5; 15].

В данной работе исследуется динамика релаксации давления в полости, окруженной насыщенной жидкостью пористой и проницаемой средой после ее опрессовки. Получено нелинейное интегральное уравнение, описывающее релаксацию давления в полости. На его основе получены численные решения и проведен анализ зависимости времени релаксации давления в полости от коллекторских характеристик окружающей пористой породы, а также от начального объемного содержания газа.

**1. Основные уравнения.** Пусть в исходном состоянии ( $t < 0$ ) давление жидкости во всем пористом пласте вокруг полости постоянно и равно  $P'_0$ , а сама полость частично заполнена жидкостью и частично газом (рис. 1). В момент времени  $t = 0$  давление в полости мгновенно увеличивается до значения  $P_0$ , например, введением некоторого количества газа. Далее, за счет фильтрации жидкости в окружающее пористое пространство, давление в полости будет снижаться до значения  $P'_0$ .

При описании этих процессов примем следующие допущения: внутри полости давление однородно, фазовые переходы и фильтрация газа через боковые поверхности полости отсутствуют, т.е. масса газа внутри полости остается постоянной в течение всего процесса. Стенки полости (трещины) плоскопараллельны, и расстояние между ними намного меньше, чем линейные размеры стенок. Фильтрация жидкости происходит только через переднюю стенку, а остальные части поверхности полости непроницаемы. Предполагается, что газовая фаза в полости находится в специальном контейнере, который исключает ее попадание в окружающую полость пористую среду. Газовая фаза будет работать как объемная «пружина», выталкивающая содержащуюся в ней жидкость в окружающее пористое пространство.

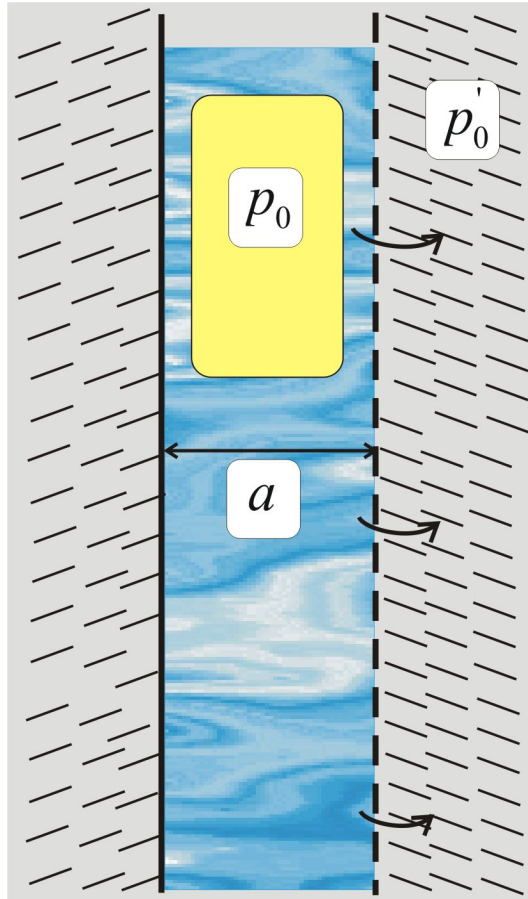


Рис. 1. Схематическое изображение полости, окруженной насыщенной жидкостью пористой средой.

В рамках вышеизложенных допущений уравнение сохранения массы жидкости внутри полости запишем в виде [3; 13]:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{1}{a} \rho_l v \Big|_{x=a}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – средняя плотность жидкости внутри полости, которая определяется по формуле  $\rho = \rho_l (1 - \alpha_g)$ ;  $\rho_l$  – плотность жидкости;  $\alpha_g$  – объемная доля газа в полости;  $a$  – полутолщина полости с плоскопараллельными стенками;  $v$  – скорость фильтрации жидкости через стенки полости.

Для определения скорости фильтрации жидкости из полости в окружающую пористую среду используем закон Дарси:

$$v' = -\frac{k}{\mu_l} \frac{\partial p'}{\partial x}, \quad (2)$$

где  $\mu_l$  – динамический коэффициент вязкости жидкости;  $k$  – коэффициент проницаемости;  $p'$ ,  $v'$  – давление и скорость фильтрации жидкости вокруг полости.

Поле давления вокруг полости описывается с помощью уравнения пьезопроводности:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = \chi_l \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2}, \quad \left( \chi_l = \frac{k \rho_{l0} C_l^2}{m \mu_l} \right), \quad a < x < \infty \quad (3)$$

Здесь  $\chi_l$  – коэффициент пьезопроводности;  $m$  – коэффициент пористости;  $C_l$  – скорость звука в жидкости.

Сжимаемость жидкости, находящейся в полости и в пористой среде, будем учитывать в акустическом приближении:

$$p = p_0 + C_l^2 (\rho_l - \rho_{l0}) \quad (4)$$

Газ будем считать калорически совершенным, тогда для его поведения примем политропический закон:

$$\alpha_g = \alpha_{g0} (p_0/p)^{1/\gamma} \quad (5)$$

где  $\gamma$  – показатель политропы,  $p_0$  – начальное давление в полости. Здесь и далее индекс (0) внизу соответствует начальному значению величины.

Начальное условие для уравнения (3) запишем в виде:

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

Граничные условия на стенке полости ( $r = a$ ) для уравнений (2), (3) могут быть записаны в виде:

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

После несложных преобразований получаем следующее интегральное уравнение, описывающее релаксацию давления в полости:

$$\alpha_{g0} \left( \left( \frac{p_0}{p} \right)^{1/\gamma} - 1 \right) - \frac{p - p_0}{\rho_{l0} C_l^2} \left( 1 - \alpha_{g0} \left( \frac{p_0}{p} \right)^{1/\gamma} \right) = \frac{k}{a^2 \mu_l} \int_0^t \varphi \left( \frac{t-t'}{t_{al}} \right) (p(t') - p'_0) dt' \quad (8)$$

где  $\varphi(S) = \frac{1}{\sqrt{\pi S}}, t_{al} = a^2/\chi_l$

**2. Результаты численных расчетов.** Уравнение (8) решается численным методом. В работе для изучения динамики релаксации давления в полости предлагается использовать период полувосстановления давления. Периодом полувосстановления давления будем называть промежуток времени, в течение которого разница между значениями давлений в полости и пористой среде снижается в два раза от начальной разницы.

На рис. 2 представлены результаты численных расчетов, иллюстрирующие процесс

релаксации давления в полости при различных значениях пористости. Для начального объемного содержания газа во всех вариантах принято значение  $\alpha_{g0} = 0.2$ , начальный перепад давления в полости равен  $\Delta p_0 = 3$  МПа. Период полувосстановления давления при  $m = 0.2$  равен  $t_1 = 20$  с, а при  $m = 0.1$  –  $t_2 = 40$  с. Увеличение пористости в два раза приводит к уменьшению периода полувосстановления давления также в два раза, т.е. период полувосстановления давления обратно пропорционален пористости.

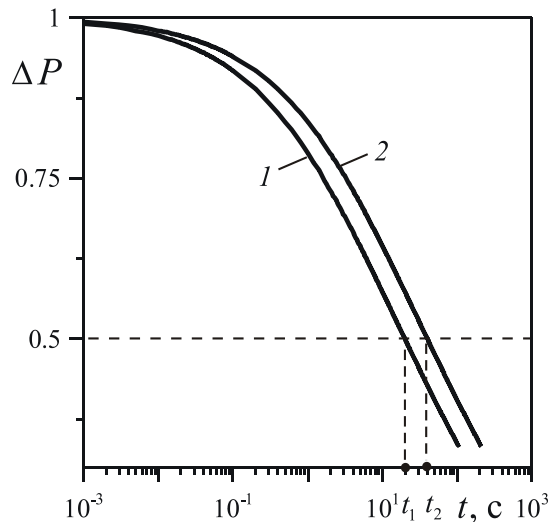


Рис. 2. Эволюция давления в полости с плоскопараллельными стенками при различных значениях коэффициента пористости  $m$ : 1 –  $m = 0.2$ ; 2 –  $m = 0.1$ .

На рис. 3 представлены зависимости периода полувосстановления давления  $t_p$  от начального объемного содержания газа при различных значениях коэффициента проницаемости  $k$ . Анализ графиков показывает, что зависимость периода полувосстановления давления от начального объемного содержания газа квадратичная, т.е.

$$t_p \sim \alpha_{g0}^2.$$

Также исследования показали, что период полувосстановления давления имеет обратную зависимость от коэффициента проницаемости пористой среды и прямую квадратичную зависимость от полутолщины полости.

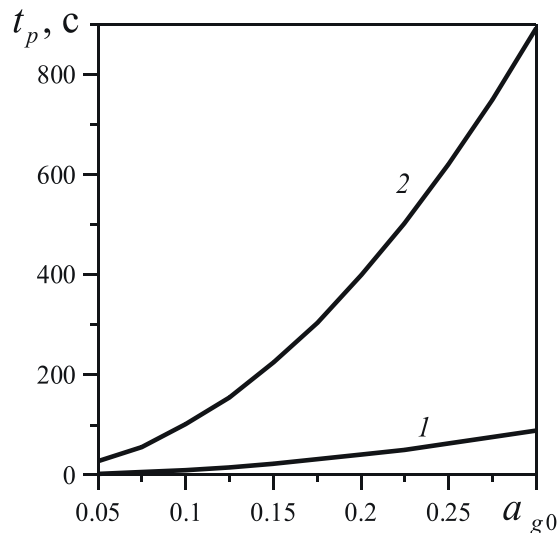


Рис. 3. Зависимости периода полувосстановления давления от начальной объемной доли газа в полости при различных значениях коэффициента проницаемости  $k$ : 1 –  $k = 10^{-13} \text{ м}^2$ , 2 –  $k = 10^{-14} \text{ м}^2$ .

**Выводы.** Разработана математическая модель и получено нелинейное интегральное уравнение, описывающее процесс релаксации давления в полости формы трещины, окруженной насыщенной жидкостью пористой средой и опрессованной введением газа. В результате численного анализа интегрального уравнения установлено: зависимость периода полувосстановления от коэффициентов проницаемости и пористости является обратно пропорциональной, а от начального объемного содержания газа является прямой квадратичной.

Полученные результаты могут быть использованы при определении метода исследования коллекторских характеристик призабойной зоны нефтяных скважин.

*Работа выполнена при поддержке гранта СФ БашГУ № В14-19.*

### Список литературы

1. Ахатов И.Ш., Хасанов М.М., Хусаинов И.Г. Авто- и стохастические колебания в гидродинамике неньютоновских жидкостей // Прикладная математика и механика. – 1993. – Т. 57. – № 1. – С. 71.
2. Володин С.В., Дмитриев В.Л., Хусаинов И.Г. Распространение линейных волн во влажных насыщенных газом пористых средах // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47. – № 5. – С. 734-740.
3. Хафизов Р.М., Хусаинов И.Г., Шагапов В.Ш. Динамика восстановления давления в «вакуумированной» скважине // Прикладная математика и механика. – 2009. – Т. 73. – № 4. – С.

615-621.

4. Хусаинов И.Г. Акустическое зондирование перфорированных скважин короткими волнами // Прикладная механика и техническая физика. – 2013. – Т. 54. - № 1 (317). – С. 86-93.
5. Хусаинов И.Г. Исследование влияния структурных изменений на реологическое поведение неньютоновских систем : автореф. дис. канд. физ.-мат. наук / Башкирский государственный университет. – Уфа, 1992.
6. Хусаинов И.Г. Отражение акустических волн в цилиндрическом канале от перфорированного участка // Прикладная математика и механика. – 2013. – Т. 77. – № 3. – С. 441-451.
7. Хусаинов И.Г. Оценка качества перфорации скважины акустическим методом // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5.
8. Хусаинов И.Г. Тепловые процессы при акустическом воздействии на насыщенную жидкостью пористую среду // Вестник Башкирского университета. – 2013. - Т. 18. - № 2. – С. 350-353.
9. Хусаинов И.Г., Дмитриев В.Л. Исследование эволюции волнового импульса при прохождении через пористую преграду // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52. – № 5 (309). – С. 136-145.
10. Хусаинов И.Г., Хусаинова Г.Я. Исследование параметров пласта методом опрессовки // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 706.
11. Хусаинов И.Г., Хусаинова Г.Я. Исследование распространения линейных волн в насыщенной газом пористой среде // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2014. – Т. 1. – № 06. – С. 94-97.
12. Шагапов В.Ш., Хусаинов И.Г., Дмитриев В.Л. Распространение линейных волн в насыщенных газом пористых средах с учетом межфазного теплообмена // Прикладная механика и техническая физика. – 2004. – Т. 45. – № 4 (266). – С. 114-120.
13. Шагапов В.Ш., Хусаинов И.Г., Хафизов Р.М. Релаксация давления в полости, окруженной пористой и проницаемой породой, при ее опрессовке введением газа // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47. - № 1 (275). – С. 109-118.
14. Шагапов В.Ш., Хусаинова Г.Я., Хусаинов И.Г., Хафизов Р.М. Релаксация давления в полости, окруженной пористой и проницаемой горной породой // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38. – № 3. – С. 106-112.
15. Akhatov I.S., Khasanov M.M., Khusainov I.G. Stability analysis for the movement of strings in thixotropic liquid // Инженерно-физический журнал. – 1994. – Т. 66. – № 4. – С. 405-411.
16. Shagapov V.Sh., Khusainov I.G., Yumaguzina A.G. Heating of a liquid-saturated porous medium by an acoustic field // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76. – № 1. – С. 11-16.

**Рецензенты:**

Мустафина С.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры математического моделирования, Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», Республика Башкортостан, г. Стерлитамак;

Михайлов П.Н., д.ф.-м.н., профессор кафедры алгебры, геометрии и методики обучения математике, Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», Республика Башкортостан, г. Стерлитамак.