

УДК 532.546; 533.15

# ЗОНДИРОВАНИЕ ПЕРФОРИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ ГАЗОВЫХ СКВАЖИН АКУСТИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ

*З. А. Булатова, А. В. Щеглов*

Стерлитамакская государственная педагогическая академия, Стерлитамак

**Аннотация.** Изучается распространение акустического сигнала в перфорированной газовой скважине.

**Ключевые слова:** акустический сигнал, пористая среда, газовая скважина, перфорация

---

## 1. Введение

Рассмотрим распространение слабых возмущений в среде, находящейся в цилиндрическом канале (скважине) с жесткими стенками, имеющем участок с перфорированными стенками и окруженном проницаемой пористой средой (Рис. 1). Приняты следующие допущения: канал и несжимаемый скелет окружающего его пористого пространства заполнены одним и тем же линейносжимаемым газом. В данной работе в качестве газа берется метан.

Будем полагать, что волна распространяется вдоль оси канала, а протяженность волновых возмущений  $\lambda$  в канале значительно больше длины проницаемого участка  $h_2$  ( $\lambda \gg h_2$ ). В силу этого допущения в проницаемом участке распределение давления будет однородным и его можно принять за «отражающую поверхность» с координатой  $z = 0$ .

Для обсаженного участка скважины примем уравнения неразрывности и импульсов, с учетом теплопроводности и вязкости газа соответственно:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( p + 2 \frac{\sqrt{\nu^T} (\gamma - 1)}{a \sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^t \frac{p(z, \tau')}{\sqrt{t - \tau'}} d\tau' \right) + \rho_0 C^2 \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

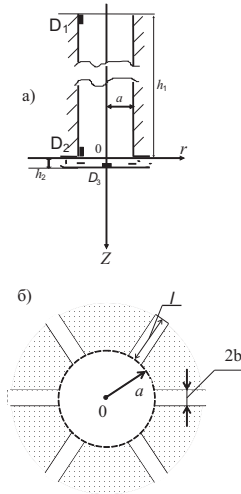


Рис. 1. Схема цилиндрической скважины: а) с проницаемым участком; б) перфорированная

$$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{2\tau}{a}, \quad (2)$$

где  $\tau$  — касательное вязкостное напряжение на внутренней поверхности стенки канала, которое может быть определено из соотношения

$$\tau = \frac{\mu_g}{\sqrt{\pi\nu^\mu}} \int_{-\infty}^t \frac{(\partial w/\partial t)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau, \quad \nu^\mu = \frac{\mu_g}{\rho_0},$$

где  $\mu_g$  — динамическая вязкость газа;  $\nu^\mu$  — кинематическая вязкость газа.

Для получения условий на «отражающей поверхности» запишем уравнение сохранения массы на проницаемом участке в линеаризованном приближении:

$$\frac{1}{C^2} \frac{\partial p}{\partial t} = \rho_0 \frac{w_- - w_+}{h_2} - \frac{2\pi b^2 n \rho_0}{a} u, \quad (3)$$

где  $w_-$  и  $w_+$  — осевая скорость среды соответственно в верхней и нижней границах проницаемого участка цилиндрического канала (скорость возмущения газа в канале на «отражающей поверхности» ( $z = 0$ ) терпит разрыв, из-за фильтрации газа через стенки канала);  $u$  — скорость фильтрации газа через проницаемые стенки;  $a$  — радиус канала;  $h_2$  — длина проницаемого участка;  $C$  — скорость звука в газе;  $b$  — радиус канальцев;  $n$  — плотность перфорации. Индекс (0) у параметра означает,

что его значение отнесено к начальному (невозмущенному) состоянию. В случае, когда проницаемый участок снизу граничит с герметичной стенкой (например, проницаемый участок находится вблизи дна скважины), в (3) следует принять  $w_+ = 0$ . А также уравнение импульсов:

$$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Для определения скорости фильтрации через радиальные трубчатые каналыца запишем уравнение неразрывности для газа внутри каналыца в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\pi b^2 l \rho) = \rho_0 \pi b^2 u - 2\pi b l \rho_0 u^{(1)}. \quad (5)$$

Скорость фильтрации газа через стенки каналыца  $u^{(1)}$  определим на основе решения уравнения импульсов

$$\frac{\partial p^{(1)}}{\partial r^{(1)}} = -\frac{\mu_g}{k^{(1)}} u^{(1)} \quad (6)$$

и уравнения неразрывности

$$m^{(1)} \frac{\partial p^{(1)}}{\partial t} + \frac{\rho_0}{r^{(1)}} \frac{\partial (r^{(1)} u^{(1)})}{\partial r^{(1)}} = 0, \quad (7)$$

где  $\mu_g$  — динамическая вязкость газа;  $m^{(1)}$ ,  $k^{(1)}$  — соответственно коэффициенты пористости и проницаемости;  $p^{(1)}$ ,  $u^{(1)}$  — распределение давления и скорости фильтрации вокруг канала. При этом на цилиндрической границе каналыца выполняется условие:

$$u = u^{(1)}|_{r^{(1)}=b}. \quad (8)$$

Уравнения (6) и (7) необходимо решать при следующих граничных условиях:

$$p^{(1)} = p, r^{(1)} = b, \quad (9)$$

$$p^{(1)} = 0, r^{(1)} \rightarrow \infty. \quad (10)$$

Пусть исходное возмущение представляет собой волну, падающую на «отражающую поверхность» сверху ( $z < 0$ ). Тогда в процессе взаимодействия этой волны с «отражающей поверхностью» движение в левой зоне ( $z < 0$ ) определяется наложением двух волн (падающей и отраженной), а в правой зоне — одной волной (прошедшей). На «отражающей поверхности» справедливы соотношения, вытекающие из условия непрерывности давления и неразрывности среды на границе

$$p^{(O)} + p^{(R)} = p^{(G)}, \quad w_- = w^{(O)} + w^{(R)}, \quad w_+ = w^{(G)}(z = 0). \quad (11)$$

Здесь верхние индексы ( $O$ ), ( $R$ ) и ( $G$ ) определяют значения возмущений параметров в падающей, отраженной и прошедшей волнах. Для случая непроницаемой правой стенки ( $w_+ = 0$ ) в (11)  $p^{(G)}$  выражает возмущения давления на этой стенке.

## 2. Дисперсионные уравнения

Решение задачи в волноводе ищем в виде бегущей гармонической волны:

$$W = A_W \exp[i(Kz - \omega t)], \quad i = \sqrt{-1}, \quad C_p = \frac{\omega}{\operatorname{Re}(K)}, \quad \delta = \operatorname{Im}(K), \quad (12)$$

где  $W$  — возмущение параметров;  $A_W$  — амплитуда параметра  $W$ ;  $i$  — мнимая единица;  $K$  — волновой вектор, который представляет из себя комплексное число;  $\omega$  — круговая частота;  $C_p$  — фазовая скорость;  $\delta$  — коэффициент затухания.

Из условия существования решений вида (12) можно записать дисперсионное уравнение:

$$K = \pm \frac{\omega}{C} \sqrt{\left(1 + 2 \frac{(\gamma - 1)}{y^T}\right) \left(1 + \frac{2}{y^\mu}\right)}, \quad y^T = \sqrt{-\frac{i\omega a^2}{\nu^T}}, \quad y^\mu = \sqrt{-\frac{i\omega a^2}{\nu^\mu}}.$$

С учетом (12) из (4)–(6) можно получить:

$$A_p^{(1)} = \frac{1}{y_b^2} \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \frac{\partial A_p^{(1)}(R)}{\partial R} \right), \quad y_b = -\frac{i\omega b^2}{\nu^p} - \frac{\omega^2 b^2}{C^2}, \quad R = \frac{r^{(1)}}{b}, \quad (13)$$

$$A_u^{(1)} = \frac{i\omega b}{2\rho_0 C^2} A_p + \frac{b}{2l} A_u. \quad (14)$$

Общее решение уравнения (13) имеет вид:

$$A_p^{(1)}(R) = AI_0(yR) + BK_0(yR). \quad (15)$$

Чтобы решение (15) удовлетворяло граничному условию (9), необходимо положить  $A = 0$ . Тогда на основе уравнений (8) можно определить константу  $B$ :

$$B = \frac{A_p}{K_0(yb)}. \quad (16)$$

С учетом того, что  $M = \frac{A_p^{(G)}}{A_p^{(O)}}$ ,  $N = \frac{A_p^{(R)}}{A_p^{(O)}}$ , можно получить:

$$M = \frac{2F}{2F - h_2 K i (1 + D)}, \quad N = M - 1, \quad (17)$$

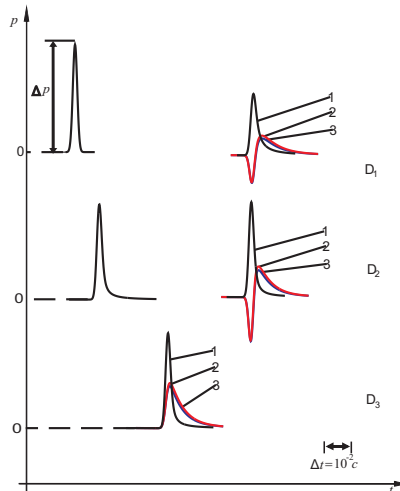


Рис. 2. Эволюционная картина акустического сигнала ( $p = 10 \cdot 10^6$  Па,  $T = 380$  К,  $\Delta t = 10^{-2}$  с) в перфорированной ( $b = 5 \cdot 10^{-3}$  м,  $n = 20$ ) скважине ( $a = 5 \cdot 10^{-2}$  м,  $h_1 = 1000$  м), окруженной пористой средой ( $h_2 = 3$  м,  $m^{(1)} = 0.2$ ,  $k^{(1)} = 10^{-13}$  м<sup>2</sup>), при различной длине канальцев перфорации: 1– $l = 0$  м, 2– $l = 2 \cdot 10^{-2}$  м, 3– $l = 4 \cdot 10^{-2}$  м

$$\text{где } D = \frac{2\pi n l b^2}{a} \left( 1 + \frac{2m^{(1)}}{y_b} \ln(K_0(y_b))' \right).$$

В случае, когда проницаемый участок находится вблизи дна, то есть  $w_+ = 0$ , (17) можно переписать в виде:

$$M = \frac{2F}{F - h_2 K i (1 + D)}, \quad N = M - 1. \quad (18)$$

На Рис. 2 приведены расчетные осциллограммы, иллюстрирующие эволюцию волнового сигнала, запущенного с расстояния  $h_1 = 1000$  м от проницаемого участка. При этом проницаемый участок находится вблизи дна скважины. Осциллограммы 1, 2 и 3 соответствуют показаниям датчиков  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_3$ , расположенных: в точке запуска сигнала, вблизи перфорированного проницаемого участка  $z = 0$  и в проницаемом участке. Исходный сигнал представляет собой импульс давления колоколообразной формы единичной амплитуды. Временная протяженность исходного импульса равна  $\Delta t = 10^{-2}$  с. Для представленного примера окружающая цилиндрический канал  $a = 5 \cdot 10^{-2}$  м пористая среда ( $k^{(1)} = 10^{-13}$  м<sup>2</sup>,  $m^{(1)} = 0.2$ ,  $l = 0.4$  м,  $h_2 = 3$  м,  $b = 5 \cdot 10^{-3}$  м,  $n = 20$ ) однородна. Первый

всплеск в осциллограмме датчика  $D_1$  выражает исходный сигнал, запущенный с расстояния  $h_1 = 1000$  м от перфорированного участка. Этот импульс достигает проницаемого участка несколько ослабленным из-за проявления вязкости газа и тепловых потерь в процессе его распространения в канале (первый всплеск в осциллограмме датчика  $D_2$ ). Второй всплеск на этой же осциллограмме — отраженный сигнал от перфорированного участка. Далее, поскольку перфорированный проницаемый участок мы считаем за «отражающую поверхность», часть сигнала фильтруется в окружающую пористую среду (первый всплеск в осциллограмме датчика  $D_3$ ), а часть отражается (второй всплеск в осциллограмме датчика  $D_2$ ) и возвращается к датчику  $D_1$  (второй всплеск в осциллограмме датчика  $D_1$ ). Представленные расчетные осциллограммы иллюстрируют возможность оценки глубины залегания проницаемого пласта (по второму всплеску в осциллограмме датчика  $D_1$ ). Кроме того, по величинам амплитуды вернувшихся сигналов можно судить о коллекторских характеристиках проницаемого участка (проницаемости, пористости), а также о качестве вскрытия перфорированного участка.

### 3. Заключение

Приведенные результаты расчетов показывают, что отраженный от проницаемого донного участка перфорированной скважины акустический сигнал будет содержать информацию о коллекторских характеристиках этого участка и качестве перфорации.

### Список литературы

- [1] Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 211 с.
- [2] Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд. М.: Наука, 1972. 341 с.
- [3] Ивакин Б. Н., Карус Е. В., Кузнецов О. Л. Акустический метод исследований скважин. М. 1978.
- [4] Shagapov V. Sh., Khlestkina N. M., Lhuillier D. Acoustic waves in channels with porous and permeable walls // *Transport in Porous Media*. 1999. V. 35, № 3. P. 327–344.