

УДК 532.529.534.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВА ПЕРФОРАЦИИ СКВАЖИНЫ С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСОВ ДАВЛЕНИЯ

А. А. Ишмухаметова, И. Г. Хусаинов

Стерлитамакская государственная педагогическая академия, Стерлитамак

Аннотация. Представлена задача коротковолнового акустического каротажа перфорированной скважины. Получены коэффициенты отражения и прохождения импульсов волн давления на границе между обсаженным и перфорированным участками скважины. Сделан вывод о возможности использования данного метода для оперативного контроля качества вскрытия пласта.

Ключевые слова: пористая среда, качество вскрытия, математическое моделирование, перфорированная скважина

1. Введение

Как известно, акустические методы достаточно широко применяются для обследования скважин и горных пород вокруг них. При этом большинство способов акустического каротажа основано на интерпретации сигналов с использованием различных известных закономерностей распространения, затухания и отражения продольных и поперечных упругих волн в слоисто-неоднородных флюидонасыщенных пористых породах.

2. Математическая модель

Рассмотрим продуктивный пласт, который сообщается со стволом скважины, обсаженным колонной стальных труб, вскрытой с помощью пуле-

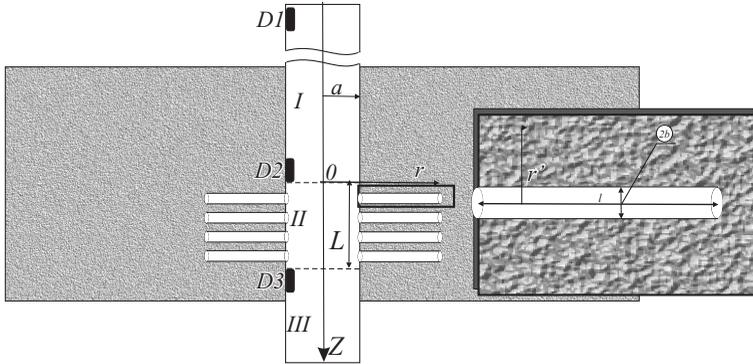


Рис. 1. Схема перфорированного участка скважины

вой перфорации. Глубина проникновения пуль в толщу пласта зависит от мощности заряда и прочностных свойств породы.

Пусть обсаженная скважина (Рис. 1) радиуса a имеет вскрытый участок длины L . На стенках скважины находятся источник D_1 и приемники D_2 , D_3 сигналов, которые фиксируют изменения параметров акустической волны. Предполагается, что перфорационные каналы расположены равномерно с плотностью n на единицу площади поверхности скважины и имеют одинаковую длину l и радиус b .

Рассмотрим распространение акустической волны малой амплитуды вдоль оси z . Предполагается что длина волны λ много меньше длины пронизываемого участка L ($\lambda \ll L$). Считаем, что и скважина, и пористый пласт полностью заполнены одной и той же жидкостью, принятой сжимаемой в акустическом приближении $p = \rho C^2$, а скелет пористой среды несжимаем. Здесь p и ρ возмущения давления и плотности среды, а C — скорость звука в жидкости.

В системе «скважина–окружающий пористый пласт» можно выделить три зоны.

Зоны обсаженной скважины (I и III). Для этих зон записываются следующие уравнения неразрывности и импульсов:

$$\rho_0 \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial w_J}{\partial z}, \quad \rho_0 \frac{\partial w_J}{\partial t} = -\frac{\partial p_J}{\partial z}, \quad (1)$$

где ρ_0 — плотность жидкости в невозмущенном состоянии; w — скорость жидкости в скважине, а индексы J означают номер зоны (I–III соответственно).

Зона перфорированного участка скважины (II). Уравнения неразрывности и импульсов для этого участка имеют вид:

$$\rho_0 \frac{\partial p_{II}}{\partial t} + \frac{\partial w_{II}}{\partial z} = -\frac{2\pi b^2 n}{a} u, \quad \rho_0 \frac{\partial w_{II}}{\partial t} = -\frac{\partial p_{II}}{\partial z}. \quad (2)$$

Для нахождения скорости фильтрации жидкости из скважины в перфорационные каналы u необходимо решить для них акустическую задачу, описывающую процесс распространения акустической волны в пористом пласте. Она состоит из уравнения сохранения массы жидкости внутри перфорационного канала, уравнения пьезопроводности и закона Дарси для фильтрации жидкости из перфорационного канала в окружающую пористую среду [1]

$$\begin{aligned} \pi b^2 l \frac{\partial \rho}{\partial t} &= \pi b^2 \rho_0 u - 2\pi b l \rho_0 \tilde{u}, \\ \frac{\partial p'}{\partial t} &= \varkappa \frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left(r' \frac{\partial p'}{\partial r'} \right), \quad \tilde{u}' = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p'}{\partial r'} \quad \left(\varkappa = \frac{kC^2 \rho_0}{\mu m} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где \tilde{u} — скорость фильтрации флюида через стенки канала; μ — вязкость жидкости; m и k — соответственно коэффициенты пористости и проницаемости окружающей скважину пористой среды; \varkappa — коэффициент пьезопроводности; p , u' — распределение давления и скорости фильтрации вокруг канала.

Из условия неразрывности скорости и давления на границе $r' = b$ следуют граничные условия для уравнений. Тогда граничные условия запишем в виде:

$$\tilde{u}' = \tilde{u}, \quad p' = p \quad (r' = b). \quad (4)$$

При задании выражения граничного условия для уравнений пьезопроводности рассмотрим предельный случай, когда глубина проникновения волн давления r'_ω сравнима или превышает среднее расстояние между соседними каналами r'_* . В этом случае будем полагать, что соседние каналы равноправны между собой и нет перетока жидкости между ними. Тогда граничные условия запишем в виде:

$$\frac{\partial p'}{\partial r'} = 0 \quad (r' \rightarrow \infty). \quad (5)$$

За величину r'_* примем среднее расстояние между основаниями перфорационных каналов на поверхности скважины. Тогда полагая, что перфорационные каналы расположены равномерно с плотностью n на единицу площади, имеем $r'_* = \sqrt{1/n}$.

3. Отражение и прохождение гармонических волн

Решение задачи ищем в виде бегущей гармонической волны

$$\begin{aligned} p &= A_p \exp [i(Kz - \omega t)], & w &= A_w \exp [i(Kz - \omega t)], \\ u &= A_u \exp [i(Kz - \omega t)], & p' &= A_{p'} \exp [i(Kz - \omega t)], \end{aligned} \quad (6)$$

где K и ω — соответственно комплексное волновое число и круговая частота возмущений.

Дисперсионные выражения для зон I и III получим, решая уравнения (1) $K_J = \pm\omega/C$.

Подставив (6) в (2)–(5) получим систему относительно амплитуд скоростей и давлений. Решение акустической задачи (3) тогда примет вид:

$$A_{\tilde{u}} = -\frac{ky}{\mu b} A_{p_{II}} \Psi(y), \quad A_u = \left[-i \frac{l\omega}{\rho_0 C^2} - \frac{2}{b^2} \frac{ky}{\mu} \Psi(y) \right] A_{p_{II}}. \quad (7)$$

Функция $\Psi(y)$ зависит от граничного условия (5) и определяется по формуле

$$\Psi(y) = \frac{K_1(y_{ef})I_1(y) - I_1(y_{ef})K_1(y)}{K_1(y_{ef})I_0(y) - I_1(y_{ef})K_0(y)}, \quad (8)$$

где $y = \sqrt{-i\omega b^2/\alpha}$, а $y_{ef} = \sqrt{-i\omega r_*'/\alpha}$; $K_\gamma(y)$ — функция Макдональда; $I_\gamma(y)$ — функция Бесселя первого рода порядка γ .

Разрешив систему (2) относительно амплитуды давления и подставив выражение (7) для A_u , получим дисперсионное выражение для зоны II

$$K_{II} = \frac{\omega}{C} \sqrt{1 + \frac{2\pi n b^2 l}{a} - i \frac{4\pi n l C^2 k y}{\nu \omega a} \Psi(y)}. \quad (9)$$

Зная K_I и K_{II} можно вычислить коэффициенты отражения N и прохождения M акустического сигнала

$$N = \frac{K_I - K_{II}}{K_I + K_{II}}, \quad M = \frac{2K_I}{K_I + K_{II}}, \quad (10)$$

а фазовая скорость C_p и коэффициент затухания волн давления δ в перфорированном участке определяются по формулам $C_p = \omega/\text{Re}(K_{II})$, $\delta = \text{Im}(K_{II})$.

Из дисперсионного выражения для зоны II следует, что волновое число сильно зависит от комплекса параметров $n l b/a$. Качество вскрытия пласта зависит от таких параметров как радиус (b), длина (l) и плотность

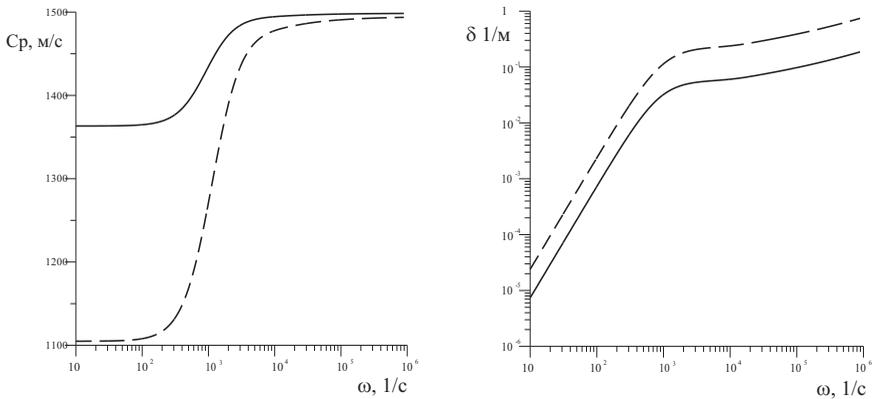


Рис. 2. Зависимость фазовой скорости и коэффициента затухания гармонических волн давления от частоты при различных значениях параметра 1. Сплошная линия: $l = 0.1$ м; пунктирная линия: $l = 0.4$ м

(n) каналов. Радиус каналов определяется размером пуль, а их плотность определяется типом перфоратора [2]. Поэтому неизвестной величиной, от которой зависит качество вскрытия, является глубина проникновения пуль l .

Анализ зависимости фазовой скорости C_p , коэффициента затухания акустических возмущений δ в перфорированном участке скважины от частоты на основе выражения (9), а также коэффициентов отражения N и прохождения M акустического сигнала на границе $z = 0$ между обсаженным и перфорированным участком скважины был проведен при следующих значениях параметров скважины, зонда, перфорационных каналов, жидкости и пористой среды: $a = 6 \cdot 10^{-2}$ м, $L = 2$ м, $n = 100 \text{ м}^{-2}$, $b = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $C = 1500$ м/с, $\nu = 1.06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $k = 10^{-12} \text{ м}^2$, $m = 0.2$. Сплошные линии соответствуют расчетам для $l = 0.1$ м; пунктирные — $l = 0.4$ м.

На Рис. 2 иллюстрируется зависимость фазовой скорости и коэффициента затухания акустических возмущений от частоты в перфорированном участке скважины при различных значениях l . Из графиков для C_p видно, что в перфорированном участке для частот от 10 до 10^4 1/с наблюдается дисперсия, причем для $l = 0.4$ м фазовая скорость возрастает от 1100 до 1500 м/с, а для $l = 0.1$ м — от 1350 до 1500 м/с. Анализируя графики зависимости δ от частоты можно отметить возрастание коэффициента затухания от 10^{-4} до 1 1/м для $l = 0.4$ м и от 10^{-4} до 10^{-1} 1/м для $l = 0.1$ м.

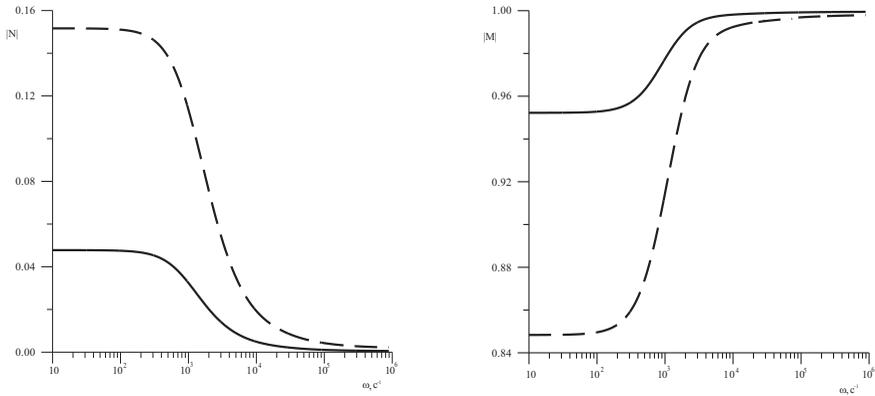


Рис. 3. Влияние параметра l перфорации на динамику прохождения и отражения акустического сигнала: сплошная линия: $l = 0.1$ м; пунктирная линия: $l = 0.4$ м

Из Рис. 3 видно, что для частот от 10 до 10^3 1/с волны от границы при $z = 0$ отражаются как от свободной поверхности. Причем при $l = 0.4$ м перфорированный участок акустически «мягче», чем при $l = 0.1$ м.

4. Заключение

В данной работе проведен количественный анализ влияния качества вскрытия пласта на динамику волновых импульсов, распространяющихся по жидкости в перфорированных скважинах в зависимости от характеристик исходного сигнала.

Установлено, что на динамику импульсного сигнала выраженное влияние оказывают длины l и радиусы b перфорационных каналов.

Список литературы

- [1] Баренблатт Г. Н., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984.
- [2] Григорян Н. Г., Пометун Д. Е., Горбенко Л. А., Ловля С. А., Прострелочные и взрывные работы в скважинах: Учебник для техникумов. 2-е изд., перераб. М.: Недра, 1980.