

УДК 532.529:534.2

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ПЕРФОРАЦИИ СКВАЖИНЫ ЛОКАЛЬНЫМ АКУСТИЧЕСКИМ ЗОНДИРОВАНИЕМ

В. Ш. Шагапов, И. Г. Хусаинов*, А. А. Ишмухаметова*

Институт механики Уфимского научного центра РАН, 450054 Уфа

* Стерлитамакская государственная педагогическая академия, 453103 Стерлитамак

E-mail: mslika@yandex.ru

Рассмотрена теоретическая задача локального акустического зондирования перфорированного участка скважины. Исследовано влияние коллекторских характеристик окружающей скважину пористой среды и качества перфорации (пористость, длина и радиус перфорационных каналов) на скорость и коэффициент затухания гармонических волн, а также на эволюцию волн конечной длительности, распространяющихся в перфорированном участке.

Ключевые слова: акустическое зондирование, перфорированная скважина, перфорационные каналы.

Введение. Геофизические исследования действующих или вводимых в эксплуатацию скважин являются основным источником информации для изучения, контроля и оптимизации процессов разработки нефтяных и газовых месторождений. Для обследования скважин и горных пород вокруг них широко применяются методы, основанные на том, что акустические характеристики горных пород функционально зависят от их физико-механических свойств, пористости, структурных особенностей и характера насыщения.

В работах [1–3] для оперативного контроля состояния призабойной зоны скважины до и после обработки предлагается использовать акустические методы, учитывающие особенности эволюции волновых импульсов, распространяющихся по жидкости внутри скважины.

Целью данной работы является изучение влияния качества вскрытия скважины посредством радиальной перфорации на эволюцию акустических сигналов в жидкости, заполняющей зазор между поверхностями корпуса зонда и стенки скважины.

1. Распространение линейных волн в перфорированном участке скважины.

Пусть продуктивный пласт сообщается со стволом обсаженной скважины через отверстия, выполненные в колонне. Процесс создания таких отверстий называется перфорацией. Одним из способов перфорации является пулевой способ, при котором отверстия в колонне создаются пулями, выпущенными из стволов перфораторов, в результате чего получаются радиальные трубчатые каналы. При этом глубина проникновения пули в толщу пласта зависит от прочностных свойств окружающей скважину пористой среды.

Пусть в обсаженную скважину (рис. 1) радиусом a помещен цилиндрический зонд радиусом a_s и длиной L . Оси корпуса зонда и скважины совпадают. В поверхность зонда вмонтированы источник D1 и приемники D2, D3 акустических сигналов. Предполагается, что образовавшиеся после перфорации каналы на поверхности скважины расположены равномерно с плотностью n на единицу площади и имеют одинаковые длину l и радиус b . Примем следующие допущения: зазор между зондом и стенкой скважины, трубчатые

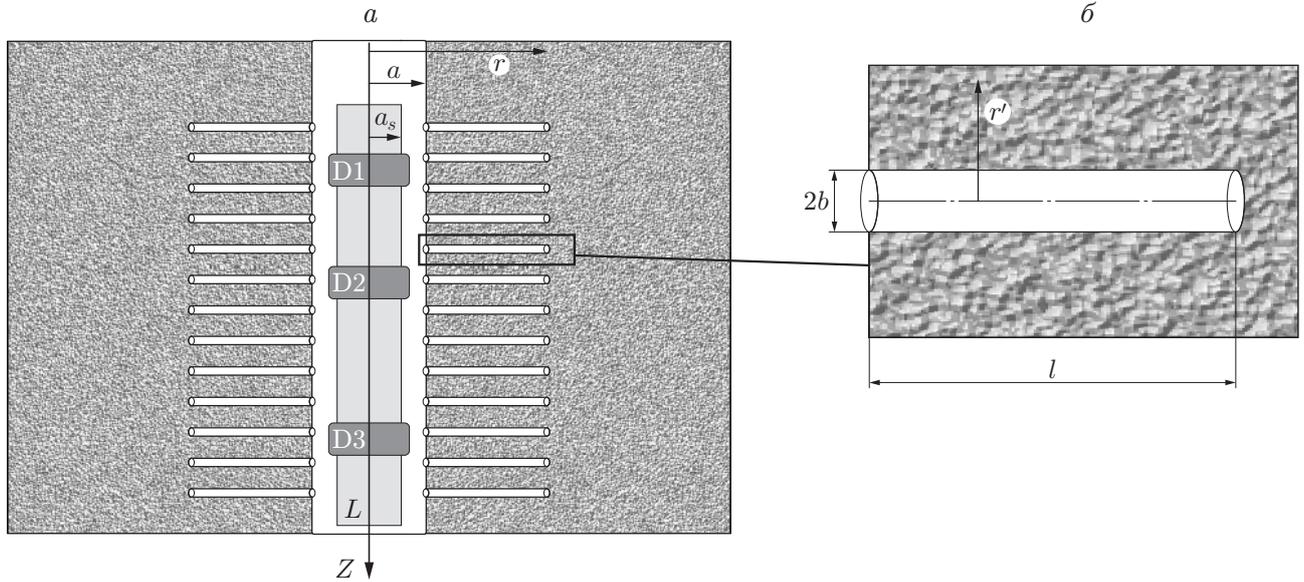


Рис. 1. Схемы перфорированного участка скважины с цилиндрическим зондом (а) и трубчатого канала (б)

каналы и окружающее проницаемое пространство заполнены одной и той же акустически сжимаемой жидкостью; скелет пористой среды является несжимаемым; длина зонда L значительно больше длины волны λ ($L \gg \lambda$), которая в свою очередь больше толщины зазора между корпусом зонда и стенкой скважины ($\lambda > a - a_s$), а также больше расстояния между двумя соседними каналами. Кроме того, будем пренебрегать влиянием вязкости жидкости на затухание импульса в зазоре между корпусом зонда и стенкой скважины (эволюция сигнала в основном определяется эффектами фильтрации в окружающее пористое пространство из перфорационных каналов).

Для описания распространения волн в жидкости, находящейся в зазоре между стенкой скважины и зондом, уравнения неразрывности, импульса и состояния запишем в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{2\pi a n b^2 \rho_0}{a^2 - a_s^2} u, \quad \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z}, \quad p = C^2 \rho, \quad (1)$$

где ρ , p — возмущения плотности и давления жидкости соответственно; ρ_0 — плотность жидкости в невозмущенном состоянии; v — скорость жидкости в зазоре между корпусом зонда и стенкой скважины; u — скорость перетока жидкости из скважины в радиальные трубчатые каналы; C — скорость звука в жидкости. Правая часть уравнения неразрывности описывает процесс утечки (или притока) жидкости из скважины через радиальные перфорационные каналы при распространении волн.

Для определения скорости перетока из скважины u уравнение сохранения массы жидкости внутри перфорационного канала запишем в виде

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

На основе решения уравнения пьезопроводности и закона Дарси для фильтрации жидкости из этих каналов в окружающую пористую среду определим скорость фильтрации флюида через стенки канала \tilde{u} :

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = \chi \frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left(r' \frac{\partial p'}{\partial r'} \right), \quad \tilde{u}' = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p'}{\partial r'} \quad \left(\chi = \frac{k C^2 \rho_0}{\mu m} \right). \quad (3)$$

Здесь μ — вязкость жидкости; m, k — коэффициенты пористости и проницаемости окружающей скважину пористой среды соответственно; χ — коэффициент пьезопроводности; p', \tilde{u}' — распределение давления и скорости фильтрации вокруг канала; r' — радиальная координата.

Используя условие непрерывности скорости и давления на границе $r' = b$, для уравнений (3) запишем следующие граничные условия:

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

Для второго граничного условия для уравнения пьезопроводности (3) рассмотрим два предельных случая: 1) глубина проникновения волн давления r'_ω меньше среднего расстояния между соседними каналами r_* , и, следовательно, фильтрационные потоки жидкости из двух соседних перфорационных каналов слабо взаимодействуют между собой; 2) величина r'_ω сравнима с величиной r_* или превышает ее. Будем полагать, что вокруг соседних каналов имеются одинаковые поля давления и переток жидкости через границу между соседними каналами отсутствует. Для этих случаев граничные условия можно записать в виде

$$p' = 0 \quad (r' = \infty) \quad (4)$$

или

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

В качестве величины r_* примем половину среднего расстояния между основаниями перфорационных каналов на поверхности скважины. Тогда в предположении, что перфорационные каналы расположены равномерно с плотностью n на единицу площади, имеем $r_* = 0,5\sqrt{1/n}$.

Решение задачи будем искать в виде бегущей гармонической волны:

$$p = A_p \exp(iKz - i\omega t), \quad v = A_v \exp(iKz - i\omega t), \quad u = A_u \exp(iKz - i\omega t), \quad (6)$$

$$p' = A_{p'}(r') \exp(iKz - i\omega t), \quad \tilde{u}' = A_{\tilde{u}'}(r') \exp(iKz - i\omega t) \quad (b < r').$$

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

Подставляя выражение (6) в уравнения (1)–(3) и проводя преобразования, получаем систему, связывающую амплитуды p, p', \tilde{u} :

$$A_u = -i \frac{a^2 - a_s^2}{2\pi a n b^2 \omega} \left(K^2 - \frac{\omega^2}{C^2} \right) A_p, \quad A_p = i \frac{C^2}{\omega} \rho_0 \left(\frac{A_u}{l} + 2 \frac{k}{b\mu} \left(\frac{dA_{p'}}{dr'} \right) \Big|_{r'=b} \right). \quad (7)$$

Для амплитуды распределения давления жидкости вокруг перфорационного канала получаем уравнение Бесселя

$$\frac{d^2 A_{p'}}{dr'^2} + \frac{1}{r'} \frac{dA_{p'}}{dr'} - q^2 A_{p'} = 0 \quad \left(q^2 = -\frac{i\omega}{\chi} \right).$$

Для амплитуд давлений из граничных условий (4), (5) следует

$$A_{p'} = A_p \quad (r' = b); \quad (8)$$

$$A_{p'} = 0 \quad (r' = \infty_*) \quad \text{или} \quad \frac{dA_{p'}}{dr'} = 0 \quad (r' = r_*). \quad (9)$$

С учетом (8), (9) из системы (7) получаем дисперсионное выражение

$$K = \frac{\omega}{C} \sqrt{1 + \frac{2\pi a n b^2 l}{a^2 - a_s^2} - i \frac{4\pi a n l C^2 k y}{\omega \nu (a^2 - a_s^2)}} \Psi(y) \quad \left(y = \sqrt{-\frac{i\omega b^2}{\chi}} \right), \quad (10)$$

где $\nu = \mu/\rho_0$ — кинематическая вязкость жидкости. В зависимости от граничных условий (8), (9) функция $\Psi(y)$ определяется соответственно по формулам

$$\Psi(y) = -\frac{K_1(y)}{K_0(y)} \quad \text{или} \quad \Psi(y) = \frac{K_1(y_*)I_1(y) - I_1(y_*)K_1(y)}{K_1(y_*)I_0(y) + I_1(y_*)K_0(y)} \quad \left(y_* = \sqrt{-\frac{i\omega r_*^2}{\chi}}\right).$$

Здесь $K_\gamma(y)$ — функция Макдональда; $I_\gamma(y)$ — функция Бесселя первого рода порядка γ . Фазовая скорость C_p и коэффициент затухания δ волн давления определяются по формулам $C_p = \omega/\text{Re}(K)$, $\delta = \text{Im}(K)$.

Из дисперсионного выражения следует, что зависимость волнового числа от геометрических параметров скважины, зонда, а также от величин b, l, n , определяющих качество вскрытия, выражается комплексом параметров $anlb/(a^2 - a_s^2)$. При этом радиус каналов определяется размером пуль, а их плотность — типом перфоратора [4]. Следовательно, неизвестной величиной, от которой зависит качество вскрытия, является глубина перфорации l .

Анализ зависимости фазовой скорости C_p и коэффициента затухания акустических возмущений δ в зазоре между зондом и скважиной от частоты на основе выражения (10) проведен при следующих значениях параметров скважины, зонда, жидкости и пористой среды: $a = 6 \cdot 10^{-2}$ м, $a_s = 4 \cdot 10^{-2}$ м, $n = 100$ м⁻², $b = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $L = 2$ м, $C = 1500$ м/с, $\nu = 1,06 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $k = 10^{-12}$ м², $m = 0,1$. Для данных значений параметров определим область частот, для которой можно использовать выражение (10). В принятых допущениях имеем $\lambda > a - a_s$, $\lambda > r_*$. Так как для используемых в работе параметров $a - a_s = 0,02$ м, $r_* \simeq 0,1$ м, то длина волны $\lambda > 0,1$ м. Учитывая, что $\lambda \simeq 2\pi C/\omega$, для частоты возмущений получаем условие $\omega < \omega_d$ ($\omega_d \simeq 2\pi C/r_*' \simeq 10^5$ с⁻¹).

На рис. 2 показаны зависимости фазовой скорости и коэффициента затухания акустических возмущений от частоты в зазоре между двумя соосными каналами. Из рис. 2

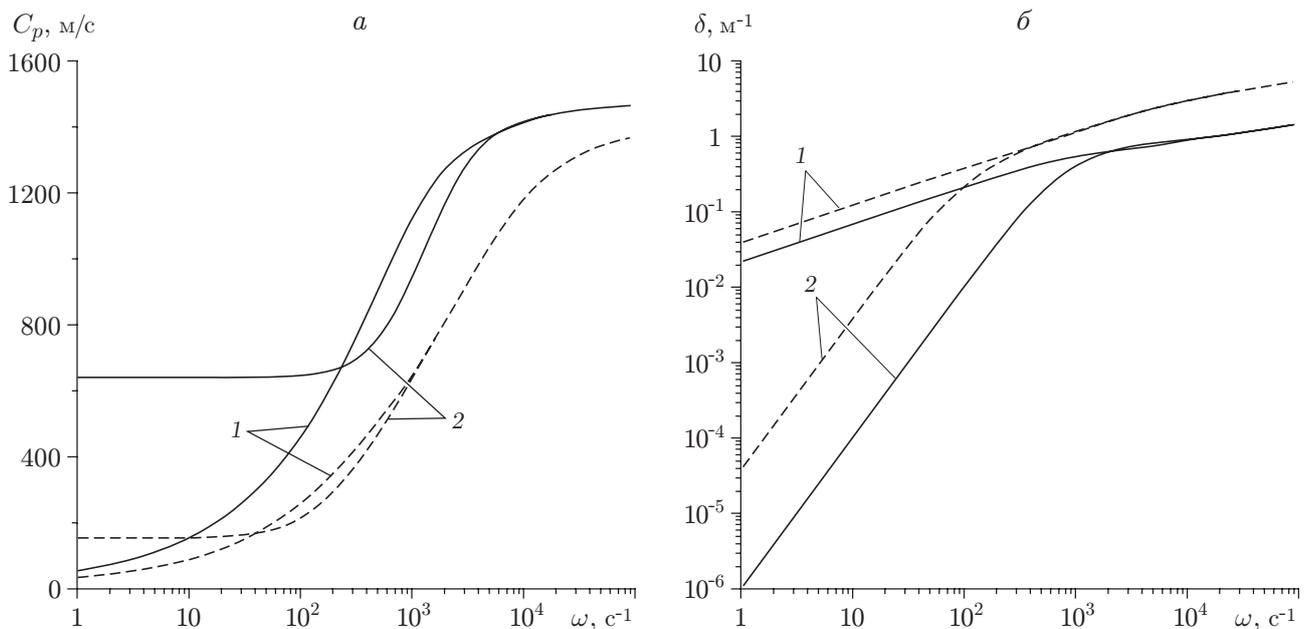


Рис. 2. Зависимости фазовой скорости (а) и коэффициента затухания гармонических волн давления (б) от частоты: сплошные линии — $l = 0,1$ м, штриховые — $l = 0,4$ м; 1 — решение с использованием граничного условия (4), 2 — решение с использованием граничного условия (5)

следует, что глубина перфорации l оказывает значительное влияние на представленные зависимости, особенно на коэффициент затухания δ . В частности, при высоких частотах ($\omega \geq 10^3 \text{ с}^{-1}$) с увеличением глубины перфорации в четыре раза коэффициент затухания также увеличивается приблизительно в четыре раза.

Уменьшение фазовой скорости и коэффициента затухания волн, распространяющихся по жидкости в перфорированном участке скважины, происходит за счет перетока жидкости из скважины в перфорационные каналы и фильтрации ее через боковую поверхность каналов в окружающее пористое пространство.

Глубина проникания r'_ω в пористое пространство фильтрационных волн с частотой ω определяется по формуле $r'_\omega = \sqrt{\chi/\omega}$. В случае граничного условия (4) при низких частотах ($\omega < 10^3 \text{ с}^{-1}$) $r'_\omega \gg r_*$, поэтому возмущение распространяется в основном в радиальном направлении, и фазовая скорость по координате z мала. В случае граничного условия (5) глубина проникания волны в пористое пространство ограничена расстоянием r_* , поэтому возмущение проникает только до глубины r_* , несмотря на то что при $\omega < 10^3 \text{ с}^{-1}$ $r'_\omega > r_*$. Поскольку затем происходит быстрое выравнивание давлений внутри перфорационных каналов и в окружающей их пористой среде, при низких частотах фазовая скорость не зависит от частоты, а коэффициент затухания прямо пропорционален ей.

Для высокочастотных волн ($\omega \geq 10^3 \text{ с}^{-1}$) $r'_\omega < r_*$, поэтому результаты, полученные при граничных условиях (4), (5), практически совпадают.

2. Эволюция импульсных возмущений. Рассмотрим распространение волн конечной длительности в зазоре между зондом и скважиной. Пусть датчик D1 регистрирует исходящий импульс давления, который имеет колоколовидную форму и описывается вы-

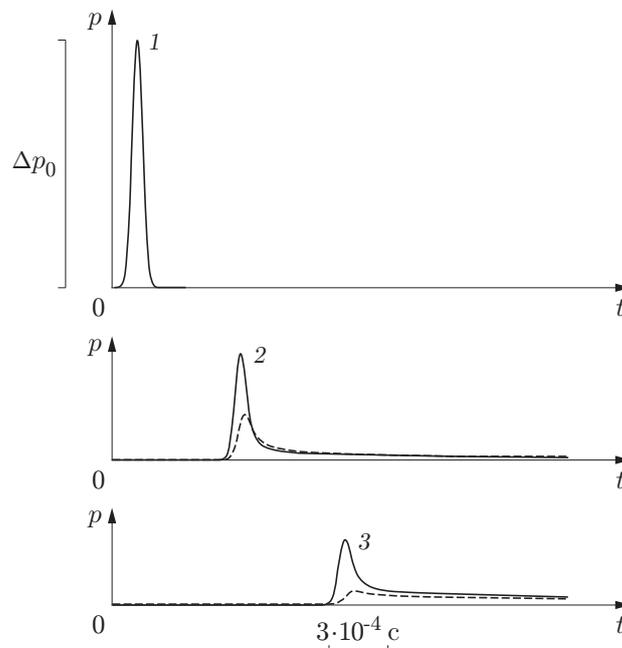


Рис. 3. Эволюция импульса волн давления в зависимости от глубины перфорационного канала при $k = 10^{-12} \text{ м}^2$, $m = 0,1$, $b = 0,004 \text{ м}$: сплошные линии — $l = 0,1 \text{ м}$, штриховые — $l = 0,2 \text{ м}$; 1 — исходный сигнал, регистрируемый датчиком D1 ($z = 0$); 2 — показание датчика D2 ($z = 1 \text{ м}$); 3 — показание датчика D3 ($z = 2 \text{ м}$)

ражением

$$p^{(0)}(t) = \Delta p_0 \exp(-(t - t_m)^2 / (t_*/2)^2).$$

Здесь t_* , t_m — характерная протяженность импульса и момент времени, в который достигается максимальная амплитуда первоначального импульса.

Рассмотрим импульсы давлений, временная протяженность которых удовлетворяет условию $t_* < L/(2C_p)$. Выполнение этого условия означает, что пространственная протяженность импульса меньше величины $L/2$ — расстояния между двумя соседними датчиками.

Результаты расчета, полученные с использованием метода быстрого преобразования Фурье [5] для эволюции импульса давления, представлены на рис. 3. Протяженность импульса соответствует значению $t_* = 3 \cdot 10^{-4}$ с. Расчетные осциллограммы, полученные при граничных условиях (4), (5), практически совпадают, поскольку такие импульсы достаточно короткие и фильтрационные возмущения между соседними перфорационными каналами не взаимодействуют.

На рис. 3 показано влияние параметра l , определяющего глубину перфорации, на эволюцию импульса. Видно, что затухание импульсного сигнала существенно зависит от глубины перфорационного канала. Увеличение параметра l в два раза приводит к дополнительному затуханию амплитуды импульса более чем в два раза на расстоянии, равном 1 м, и к ее уменьшению примерно в пять раз на расстоянии, равном 2 м. Поскольку качество вскрытия перфорацией определяется величиной параметра l , полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования метода, в котором учитывается существенное влияние глубины перфорации на затухание импульсных возмущений, для экспресс-контроля качества вскрытия скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шагапов В. Ш., Булатова З. А. К теории локального акустического зондирования при скважинных областях горных пород // ПМТФ. 2002. Т. 43, № 6. С. 142–150.
2. Shagapov V. Sh., Khlestkina N. M., Lhuillier D. Acoustic waves in channels with porous and permeable walls // Transport Porous Media. 1999. V. 35. P. 327–344.
3. Гумерова Г. А. Эволюция волн на проницаемых участках каналов, окруженных пористой средой: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Тюмень, 1996.
4. Григорян Н. Г. Прострелочные и взрывные работы в скважинах / Н. Г. Григорян, Д. Е. Поветун, Л. А. Горбенко, С. А. Ловля. М.: Недра, 1980.
5. Гапонов В. А. Пакет программ быстрого преобразования Фурье с приложениями к моделированию случайных процессов. Новосибирск, 1976. (Препр. / СО АН СССР. Ин-т теплофизики; № 14-76).

*Поступила в редакцию 6/XI 2007 г.,
в окончательном варианте — 27/XII 2007 г.*