

УДК 532.546

К ТЕОРИИ ЛОКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ТРЕЩИН, ОБРАЗОВАВШИХСЯ ПРИ ГИДРОРАЗРЫВЕ ПЛАСТА, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ

В. Ш. Шагапов, Э. В. Галиакбарова*, З. Р. Хакимова*

Институт механики им. Р. Р. Мавлютова Уфимского федерального
исследовательского центра РАН, 450054 Уфа, Россия

* Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450062 Уфа, Россия
E-mails: shagapov@rambler.ru, emi.galiakbar@yandex.ru, zulfya.hakimova@yandex.ru

Исследована динамика импульсного сигнала, распространяющегося в кольцевом зазоре между диагностирующим зондом и открытой скважиной, окруженной низкопроницаемым пластом, подвергаемым гидроразрыву. Трещины расположены вдоль скважины, скважина и трещиновато-пористая среда заполнены одной и той же акустически сжимаемой жидкостью. Задача решается численно методом быстрого преобразования Фурье. Получены дисперсионные уравнения, описывающие распространение затухающих бегущих волн в зазоре с учетом фильтрации жидкости через продольные трещины. Проведен анализ влияния фильтрационных характеристик пласта, трещин гидроразрыва пласта и ширины зазора между корпусом зонда и стенкой скважины на фазовую скорость и коэффициент затухания, а также на эволюцию импульсных сигналов.

Ключевые слова: скважина, зонд, трещина, гидроразрыв пласта, гармонические волны давления, импульсный сигнал.

DOI: 10.15372/PMTF20210405

Введение. В настоящее время большинство месторождений России находятся на завершающей стадии разработки, характеризующейся низкой проницаемостью пластов и высокой вязкостью нефти. Для увеличения проницаемости пласта применяется, в частности, его гидроразрыв. Характер образующихся при этом трещин (вертикальные или горизонтальные) зависит от тектонических напряжений [1, 2].

В случае отсутствия трещин гидроразрыва пласта (ГРП) состояние пластов в призабойной зоне скважины обычно определяется методами геофизического исследования скважин на основе анализа кривых зависимости забойное давление — дебит скважины. В случае если проницаемость пластов не превышает значений порядка миллидарси, флюиды поступают в скважину через трещины, образовавшиеся при ГРП. Путем воздействия на пласт с трещинами ГРП волн давления, создаваемых электрическими или гидравлическими генераторами и распространяющихся через систему добывающих и нагнетательных скважин, можно интенсифицировать добычу нефти или газа из таких пластов за счет инициирования фильтрации флюида из пласта к трещинам и восстановления пластового давления [3–6].

В работе [7] изложены теоретические основы метода ГРП, получены основные уравнения движения однородных жидкостей в пористой среде при наличии трещин ГРП, описаны распределение потока флюида из пласта в трещину бесконечной длины и распределение давления вдоль трещины при различных проницаемостях трещины и пористой среды, а также рассчитана производительность скважины, имеющей различную ориентацию по отношению к трещинам.

В работах [8, 9] представлены дифференциальные уравнения в частных производных в задачах о неустановившемся движении жидкости по трубам, а также в задачах фильтрации подземной гидромеханики.

Полуаналитическое решение задачи о нестационарной фильтрации нефти в не ограниченном по длине и ширине пласте к скважине с вертикальной трещиной гидроразрыва предложено в [10].

В работах [11, 12] исследована динамика волн давления в вертикальной трещине гидроразрыва с учетом притока флюида в нее, предложена математическая модель в виде интегродифференциального уравнения и найдены аналитические решения, описывающие эволюцию давления в трещине с учетом фильтрации жидкости в нее и окружающую пористую проницаемую среду при различных режимах работы скважины.

Распределение давления жидкости вокруг скважины, находящейся в центре вертикальной трещины ГРП, при постоянных перепаде давления в скважине и расходе описано в [13]. В [14] исследуется распределение потоков флюидов в горизонтальную скважину после ГРП, проведенного поэтапно, а также влияние проводимости трещины, ее геометрии, угла между трещиной и скважиной. В [15, 16] рассмотрены особенности эволюции акустических волн в цилиндрических каналах, расположенных в пласте с радиальными трещинами, в зависимости от параметров неоднородной пористой среды.

В работе [17] исследуются методы интенсификации нефтедобычи при создании акустического давления в скважине.

В работе [18] изучается распространение волн в широком частотном диапазоне вдоль цилиндрической полости, окруженной проницаемой пористой средой, насыщенной неньютоновской степенной жидкостью. Проведено сравнение значений скорости распространения, коэффициента затухания волн в канале, а также глубины проникания возмущений в окружающую пористую среду со значениями этих величин в случае ньютоновской жидкости.

Существует система скважинного мониторинга [19] с использованием акустических датчиков из оптического волокна, расположенных вдоль ствола скважины. Эта система осуществляет мониторинг интегральных характеристик ГРП по интенсивности, частоте и разбросу частот акустических возмущений вблизи области растрескивания породы. Однако применение оптико-волоконной техники является дорогостоящим методом мониторинга.

Диагностику наличия и типа трещин ГРП в пластах со значениями проницаемости порядка миллидарси можно осуществлять с помощью акустического “телевизора”. Для этого в скважину необходимо поместить диагностирующий зонд с излучателем и приемниками акустических волн давления в виде датчиков давления, например пьезокерамических.

1. Основные уравнения. Пусть в скважину радиусом R помещен диагностирующий зонд радиусом r с излучателем акустических волн D_1 и датчиками давления D_2, D_3 (рис. 1). Оси корпуса зонда и скважины совпадают и направлены вдоль оси Oz . Внешняя стенка скважины является проницаемой средой. В однородном пласте имеется продольная по отношению к скважине трещина ГРП шириной d_f .

Исследуем процесс распространения волн давления малой амплитуды в кольцевом зазоре между скважиной и зондом.

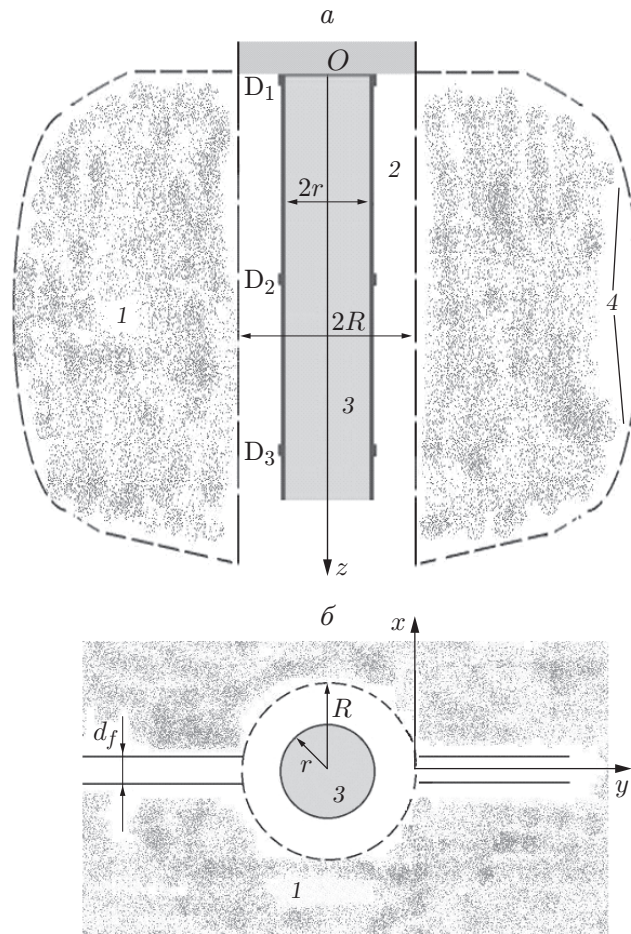


Рис. 1. Схема скважины с диагностирующим зондом для обнаружения продольной трещины ГРП:

a — вертикальный разрез, *б* — горизонтальный разрез; 1 — пласт, 2 — жидкость, 3 — зонд, 4 — трещина; D_1 , D_2 , D_3 — датчики давления

Примем следующие допущения: скважина и скелет пористой среды заполнены одной и той же акустически сжимаемой жидкостью, причем в начальном состоянии жидкость находится в состоянии покоя; длина зонда L значительно больше длины волны λ ($L \gg \lambda$), которая в свою очередь больше ширины зазора между корпусом зонда и скважиной ($\lambda > R - r$). Считаем, что влияние вязкости на процесс распространения акустической волны по зазору проявляется в тонком пограничном слое вблизи стенок кольцевого зазора. В случае гармонических волн это означает выполнение неравенства $R - r \gg 2\sqrt{\nu/\omega}$ (ν — кинематическая вязкость жидкости; ω — круговая частота) [20, 21].

Система уравнений, описывающая распространение импульсного сигнала в зазоре и представляющая собой законы сохранения массы и импульса, в плоскоодномерном приближении имеет вид

$$\pi(R^2 - r^2) \left(\frac{1}{C^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -2\pi R \rho_0 u_p \Big|_{x=0} - 2d_f \rho_0 u_f \Big|_{y=0}; \quad (1.1)$$

$$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{2\sigma}{R - r}, \quad \sigma = \rho_0 \sqrt{\frac{\nu}{\pi}} \int_{-\infty}^t \frac{\partial w / \partial \tau}{\sqrt{t - \tau}} d\tau \quad \left(\nu = \frac{\mu}{\rho_0} \right), \quad (1.2)$$

где P, w — возмущения давления и скорости; u_p, u_f — скорости фильтрации через проницаемые стенки скважины в пласт и трещину соответственно; ρ_0 — плотность жидкости в невозмущенном состоянии; C — скорость звука в жидкости; μ — динамическая вязкость жидкости; σ — касательное напряжение на поверхности стенки канала [20, 21]; нижний индекс p соответствует параметрам пористой среды, f — параметрам трещины.

Для описания потока флюида через проницаемую стенку скважины при распространении импульса давления в зазоре между корпусом зонда и внешней стенкой скважины используем уравнения фильтрации в пористой среде вокруг скважины, полагая, что характерная амплитуда фильтрационных возмущений в пласте значительно меньше радиуса скважины:

$$u_p = -\frac{k_p}{\mu} \frac{\partial P_p}{\partial x}, \quad \frac{\partial P_p}{\partial t} = \varkappa_p \frac{\partial^2 P_p}{\partial x^2} \quad (0 < x < \infty), \quad (1.3)$$

а также уравнения фильтрации в трещину, образовавшуюся при ГРП [11, 12]:

$$u_f = -\frac{k_f}{\mu} \frac{\partial P_f}{\partial y}, \quad \frac{\partial P_f}{\partial t} = \varkappa_f \frac{\partial^2 P_f}{\partial y^2} - 2 \frac{m_p}{m_f} \frac{\varkappa_p}{d_f} \int_{-\infty}^t \frac{\partial P_f(\tau, y) / \partial \tau}{\sqrt{\pi \varkappa_p (t - \tau)}} d\tau \quad (0 < y < \infty). \quad (1.4)$$

Здесь P_p, P_f — возмущения давления в пласте и трещине соответственно; m_i, k_i ($i = f, p$) — пористость и коэффициент проницаемости; $\varkappa_i = k_i \rho_0 C^2 / (m_i \mu)$ ($i = f, p$) — коэффициент пьезопроводности.

2. Дисперсионные уравнения. Решения системы уравнений (1.1)–(1.4) будем искать в виде гармонических волн [22]:

$$\begin{pmatrix} P \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^{(p)} \\ A^{(w)} \end{pmatrix} e^{i(Kz - \omega t)}, \quad \begin{pmatrix} P_p \\ u_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_p^{(p)}(x) \\ A_p^{(u)}(x) \end{pmatrix} e^{i(Kz - \omega t)}, \quad (2.1)$$

$$\begin{pmatrix} P_f \\ u_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_f^{(p)}(y) \\ A_f^{(u)}(y) \end{pmatrix} e^{i(Kz - \omega t)}.$$

Здесь ω — круговая частота; $K = k + i\delta$ — волновой вектор; $C_p = \omega/k$ — фазовая скорость; δ — коэффициент затухания.

Подставляя (2.1) в систему (1.1), (1.2), получаем

$$-\frac{i\omega}{C^2} A^{(p)} + iK\rho_0 A^{(w)} = -\frac{2R\rho_0}{R^2 - r^2} A_p^{(u)}(0) - \frac{2d_f\rho_0}{\pi(R^2 - r^2)} A_f^{(u)}(0); \quad (2.2)$$

$$-\rho_0\omega A^{(w)} + KA^{(p)} = \frac{2}{R - r} \sqrt{\rho_0\mu} \sqrt{\frac{\omega}{2}} (1 + i)A^{(w)}. \quad (2.3)$$

Подставляя (2.1) в (1.3), (1.4), имеем

$$A_p^{(u)}(x) = -\frac{k_p}{\mu} \frac{dA_p^{(p)}}{dx}, \quad -i\omega A_p^{(p)} = \varkappa_p \frac{d^2 A_p^{(p)}}{dx^2}; \quad (2.4)$$

$$A_f^{(u)}(y) = -\frac{k_f}{\mu} \frac{dA_f^{(p)}}{dy}, \quad \alpha_f^2 A_f^{(p)}(y) = \frac{d^2 A_f^{(p)}}{dy^2}, \quad (2.5)$$

где

$$\alpha_f^2 = -i \left(\frac{\omega}{\varkappa_f} + 2 \frac{m_p}{m_f} \frac{\sqrt{\varkappa_p}}{\varkappa_f} \frac{\sqrt{i\omega}}{d_f} \right).$$

Решения (2.4), (2.5) с граничными условиями [11, 12]

$$\begin{aligned} A_p^{(p)} &= A_f^{(p)} \quad (x = 0), & A_p^{(p)} &= 0 \quad (x \rightarrow \infty), \\ A_f^{(p)} &= A_p^{(p)} \quad (y = 0), & A_f^{(p)} &= 0 \quad (y \rightarrow \infty) \end{aligned} \quad (2.6)$$

имеют вид

$$\begin{aligned} A_p^{(p)}(x) &= A^{(p)} e^{-\sqrt{-i\omega/\kappa_p} x}, & A_p^{(u)}(x) &= A^{(p)} \frac{k_p}{\mu} \sqrt{\frac{-i\omega}{\kappa_p}} e^{-\sqrt{-i\omega/\kappa_p} x}, \\ A_f^{(p)}(y) &= A^{(p)} e^{-\alpha_f y}, & A_f^{(u)}(y) &= A^{(p)} \frac{k_f}{\mu} \alpha_f e^{-\alpha_f y}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

С использованием (2.6), (2.7) из уравнения (2.2) получаем

$$\left(-\frac{i\omega}{C^2} + \frac{2R\rho_0}{R^2 - r^2} \frac{k_p}{\mu} \sqrt{\frac{-i\omega}{\kappa_p}} + \frac{2d_f\rho_0}{\pi(R^2 - r^2)} \frac{k_f}{\mu} \alpha_f \right) A^{(p)} + iK\rho_0 A^{(w)} = 0. \quad (2.8)$$

Из условия существования нетривиального решения [23] системы (2.3), (2.8) следует дисперсионное уравнение

$$\begin{aligned} K = \pm \frac{\omega}{C} \left[\left(1 + \frac{1}{R-r} \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} (1+i) \right) \left(1 + \frac{Rm_p}{R^2 - r^2} \sqrt{\frac{2\kappa_p}{\omega}} (1+i) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{d_f m_f}{\pi(R^2 - r^2)} \sqrt{\frac{2\kappa_f}{\omega}} (1+i) \sqrt{1 + \frac{m_p}{m_f d_f} \sqrt{\frac{2\kappa_p}{\omega}} (1+i)} \right) \right]^{1/2}. \quad (2.9) \end{aligned}$$

Волнам, распространяющимся в положительном направлении оси Oz , соответствует знак “+” в правой части уравнения (2.9).

3. Численный анализ. На основе полученного дисперсионного уравнения (2.9) проведены численные расчеты. На рис. 2 показаны зависимости фазовой скорости и коэффициента затухания от частоты при различных значениях ширины трещины. Скважина и пласт заполнены водой. Для параметров скважины, пласта и трещины приняты следующие значения: $R = 5 \cdot 10^{-2}$ м, $r = 3 \cdot 10^{-2}$ м, $m_p = 0,1$, $k_p = 10^{-15}$ м², $k_f = 10^{-10}$ м², $m_f = 0,2$. На рис. 2 видно, что наличие трещин приводит к уменьшению фазовой скорости в области низких частот. Так, при круговой частоте $\omega = 10^4$ с⁻¹ в пласте без трещин фазовая скорость практически совпадает со скоростью звука в воде ($C_p \approx 1475$ м/с), а в пласте с трещиной шириной $d_f = 2 \cdot 10^{-3}$ м фазовая скорость уменьшается до значения $C_p \approx 1450$ м/с, при ширине трещины, равной $d_f = 5 \cdot 10^{-3}$ м, происходит уменьшение фазовой скорости до значения $C_p \approx 1375$ м/с. Вместе с тем при увеличении ширины трещины коэффициент затухания возрастает. Так, при значении круговой частоты $\omega = 10^4$ с⁻¹ в пласте без трещины коэффициент затухания равен $\delta \approx 3 \cdot 10^{-2}$ м⁻¹, в пласте с трещиной шириной $d_f = 2 \cdot 10^{-3}$ м значение коэффициента затухания равно $\delta = 0,3$ м⁻¹, при $d_f = 5 \cdot 10^{-3}$ м $\delta = 0,5$ м⁻¹.

Для изучения эволюции импульсного сигнала в зазоре между корпусом зонда и стенкой скважины используем быстрое преобразование Фурье [23] и программу его численной реализации [24, 25], а в качестве сигнала выберем импульс давления колоколообразной формы с амплитудой Δp_0 :

$$\tilde{p}^{(0)} = \Delta p(t) = \Delta p_0 \exp \left(- \left(\frac{t}{\Delta t/6} \right)^2 \right). \quad (3.1)$$

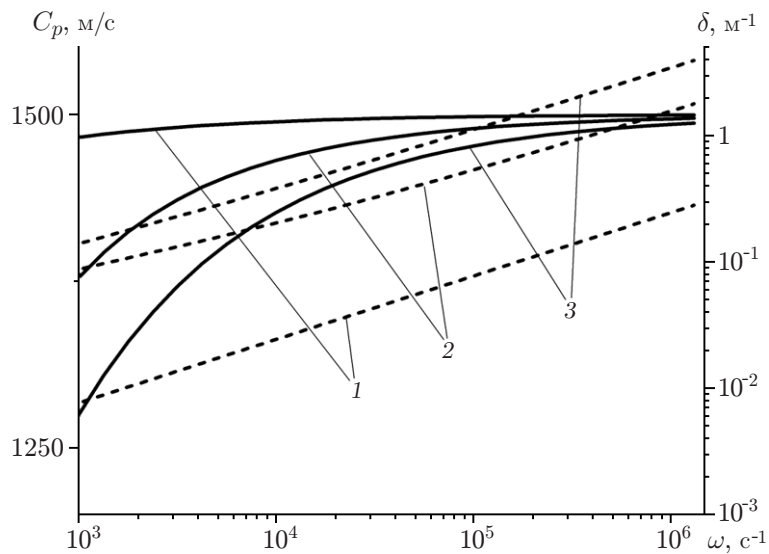


Рис. 2. Зависимости фазовой скорости (сплошные линии) и коэффициента затухания (штриховые линии) от частоты для скважины, заполненной водой, при различных значениях ширины трещины:
 1 — $d_f = 0$, 2 — $d_f = 2 \cdot 10^{-3}$ м, 3 — $d_f = 5 \cdot 10^{-3}$ м

Спектр частот для этого импульсного сигнала (3.1) имеет вид [22]

$$s(\omega) = \frac{\sqrt{\pi}}{3} \Delta p_0 \Delta t \exp\left(-\left(\frac{\omega \Delta t}{12}\right)^2\right). \tag{3.2}$$

Выберем нормированные функции для импульсного сигнала (3.1) и спектральной плотности (3.2) в виде

$$P(\Delta t) = \frac{\Delta p(t)}{\Delta p_0}, \quad S(\omega \Delta t) = \frac{s(\omega)}{s(0)},$$

тогда

$$P(\Delta t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\Delta t/6}\right)^2\right) \quad (\Delta t = t - t_0), \quad S(\omega \Delta t) = \exp\left(-\left(\frac{\omega \Delta t}{12}\right)^2\right).$$

На рис. 3 представлена зависимость нормированной спектральной плотности от частоты. Из выражения (3.2) для функции $S(\omega \Delta t)$ следует, что влияние гармоник с частотами,

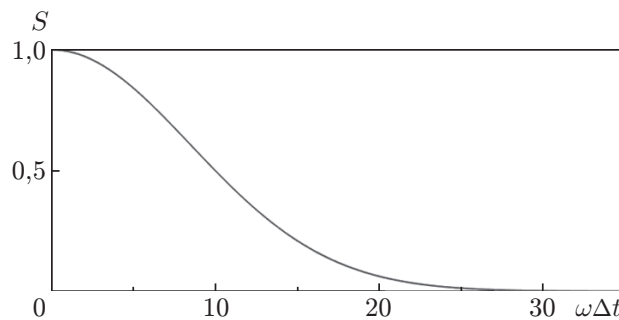


Рис. 3. Зависимость нормированной спектральной плотности от частоты для импульсного сигнала колоколообразной формы

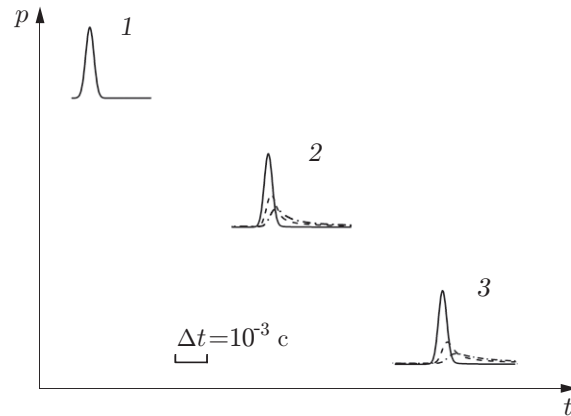


Рис. 4. Расчетные осциллограммы эволюции импульса давления, распространяющегося в кольцевом зазоре между скважиной и зондом, при различных значениях ширины трещины:

сплошные линии — $d_f = 0$, штриховые — $d_f = 2 \cdot 10^{-3}$ м, штрихпунктирные — $d_f = 5 \cdot 10^{-3}$ м; 1–3 — сигналы, принимаемые датчиками D_1 , D_2 , D_3

превышающими характерное значение ω_0 , при котором $S(\omega_0 \Delta t) = 0,1$, на эволюцию сигнала вида (3.1) является незначительным, поэтому для частоты ω_0 основной гармоники импульсного сигнала имеем

$$\omega_0 \approx 20/\Delta t. \quad (3.3)$$

Условие (3.3) позволяет также определить длительность Δt импульсного сигнала вида (3.1), удовлетворяющего указанному выше ограничению.

На рис. 4 приведены расчетные осциллограммы изменения импульсного сигнала длительностью $\Delta t = 10^{-3}$ с в зазоре между корпусом зонда и стенкой скважины при различных значениях ширины трещины. Вычисления проведены при тех же значениях параметров, при которых получены зависимости, приведенные на рис. 2. Полагалось, что длина зонда составляет $L \approx 5$ м, а датчики D_1 , D_2 , D_3 имеют координаты $z = 0, 2, 3$ м соответственно. На рис. 4 видно, что наличие трещин ГРП приводит к изменению формы сигнала и существенному уменьшению его амплитуды. Так, согласно осциллограмме, регистрируемой датчиком D_2 , при наличии трещины ГРП амплитуда сигнала уменьшается приблизительно в три ($d_f = 2 \cdot 10^{-3}$ м) и пять ($d_f = 5 \cdot 10^{-3}$ м) раз. Полученные оценки позволяют утверждать, что предложенный способ диагностики трещин достаточно эффективен при исследовании трещин ГРП.

На рис. 5 представлены зависимости фазовой скорости и коэффициента затухания от частоты для скважины, заполненной водой, при различных значениях коэффициента проницаемости. Из рис. 5 следует, что при уменьшении проницаемости пласта различие значений коэффициента затухания импульсного сигнала в пласте с трещинами ГРП и без них становится более существенным. Например, при частоте $\omega = 10^4$ с $^{-1}$ в пласте с проницаемостью $k_p = 10^{-12}$ м 2 значения коэффициента затухания при наличии трещины ($d_f = 2 \cdot 10^{-3}$ м) и в ее отсутствие различаются в 1,5 раза и равны $\delta \approx 1,5$ м $^{-1}$ и $\delta \approx 1$ м $^{-1}$ соответственно, а в пласте с проницаемостью $k_p = 10^{-15}$ м 2 эти значения различаются почти на порядок (в пласте с трещиной $\delta \approx 0,3$ м $^{-1}$, в пласте без трещины $\delta \approx 3 \cdot 10^{-2}$ м $^{-1}$). Также из рис. 5 следует, что с уменьшением частоты возмущений ω различие значений фазовых скоростей в пласте с трещинами и без них становится еще более существенным, поэтому низкочастотные составляющие импульсного сигнала более информативны. На рис. 6 приведены расчетные осциллограммы изменения импульсного

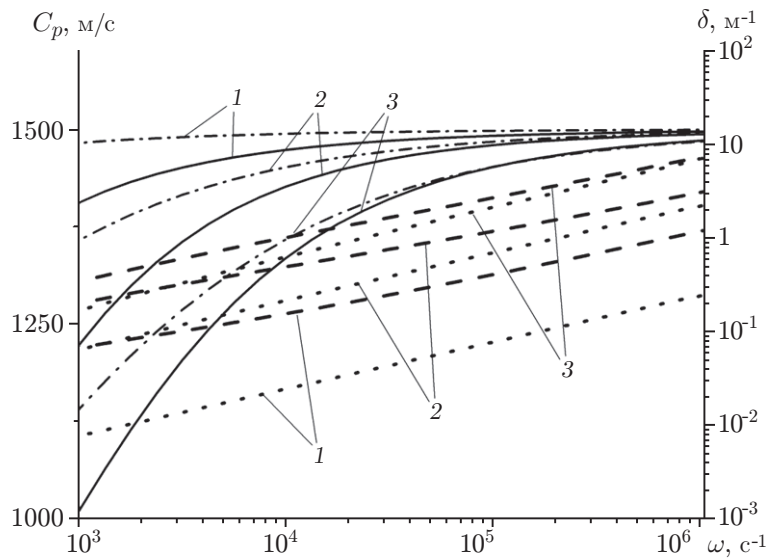


Рис. 5. Зависимости фазовой скорости (сплошные и штрихпунктирные линии) и коэффициента затухания (штриховые и пунктирные линии) от частоты для скважины, заполненной водой, при различных значениях коэффициента проницаемости пласта:

1 — $k_p = 10^{-15} \text{ м}^2$, 2 — $k_p = 10^{-13} \text{ м}^2$, 3 — $k_p = 10^{-12} \text{ м}^2$; сплошные и штриховые линии — при наличии трещины шириной $d_f = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, штрихпунктирные и пунктирные — в отсутствие трещины

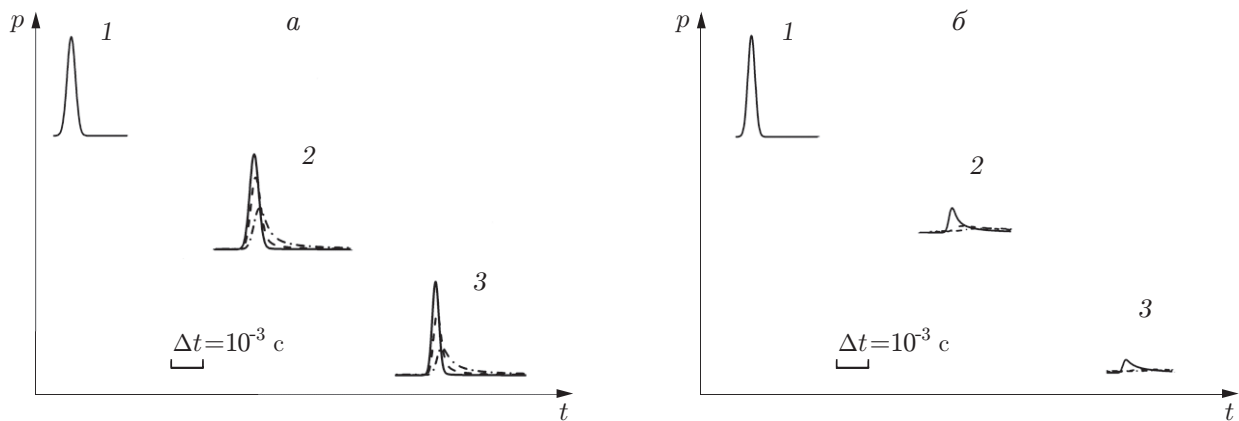


Рис. 6. Расчетные осциллограммы эволюции импульсного сигнала, распространяющегося в зазоре, при различных значениях коэффициента проницаемости пласта:

а — в отсутствие трещины, б — при наличии трещины шириной $d_f = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; сплошные линии — $k_p = 10^{-15} \text{ м}^2$, штриховые — $k_p = 10^{-13} \text{ м}^2$, штрихпунктирные — $k_p = 10^{-12} \text{ м}^2$; 1-3 — сигналы, принимаемые датчиками D_1, D_2, D_3

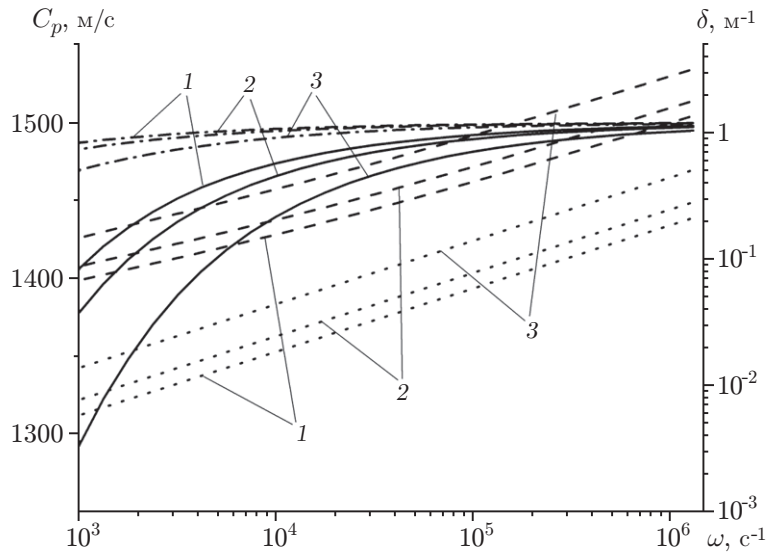


Рис. 7. Зависимости фазовой скорости (сплошные и штрихпунктирные линии) и коэффициента затухания (штриховые и пунктирные линии) от частоты для скважины, заполненной водой, при различных значениях ширины зазора: 1 — $R - r = 3 \cdot 10^{-2}$ м, 2 — $R - r = 2 \cdot 10^{-2}$ м, 3 — $R - r = 10^{-2}$ м; сплошные и штриховые линии — при наличии трещины шириной $d_f = 2 \cdot 10^{-3}$ м, штрихпунктирные и пунктирные — в отсутствие трещины

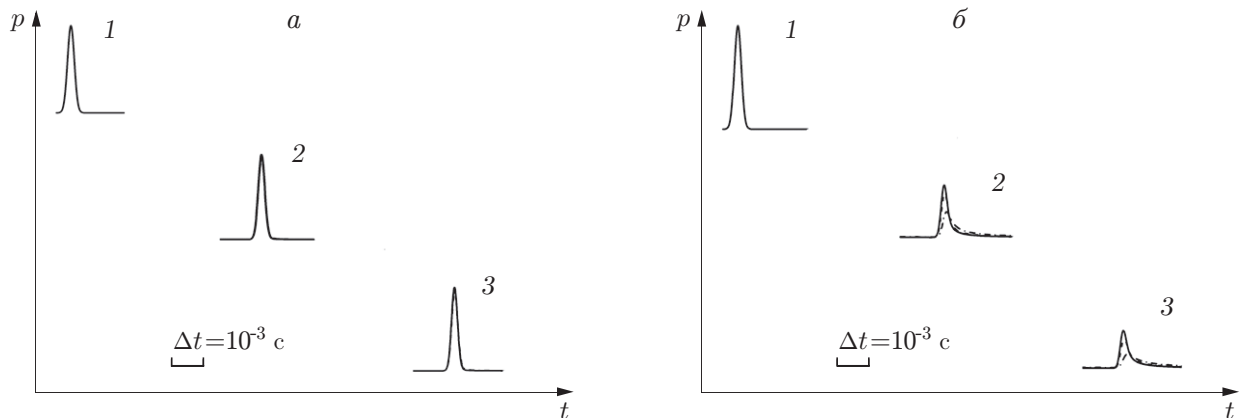


Рис. 8. Расчетные осциллограммы эволюции импульсного сигнала, распространяющегося в зазоре, при различных значениях ширины зазора: а — в отсутствие трещины, б — при наличии трещины шириной $d_f = 2 \cdot 10^{-3}$ м; сплошные линии — $R - r = 3 \cdot 10^{-2}$ м, штриховые — $R - r = 2 \cdot 10^{-2}$ м, штрихпунктирные — $R - r = 10^{-2}$ м; 1-3 — сигналы, принимаемые датчиками D_1, D_2, D_3

сигнала, распространяющегося в зазоре, при различных значениях коэффициента проницаемости пласта. Из рис. 6 следует, что диагностика трещин ГРП более эффективна в низкопроницаемых пластах ($k_p = 10^{-15} \text{ м}^2$), при наличии трещин скорость уменьшения амплитуды сигнала резко увеличивается.

На рис. 7 представлены зависимости фазовой скорости и коэффициента затухания от частоты при различных значениях ширины зазора $R - r$. Параметры скважины и пласта такие же, как для рис. 2. На рис. 8 приведены расчетные осциллограммы импульсного сигнала, распространяющегося в зазоре различной ширины. Видно, что при уменьшении ширины зазора между скважиной и зондом увеличивается скорость затухания импульсного сигнала (показания датчиков D_2 и D_3 на рис. 8). Следовательно, уменьшение ширины зазора между корпусом зонда и стенкой скважины понижает точность данного способа диагностики трещин ГРП.

Заключение. Таким образом, возможна диагностика системы трещин ГРП в низкопроницаемых пластах при значениях проницаемости порядка миллидарси с использованием импульсных сигналов, исходящих от диагностирующего зонда, расположенного внутри скважины. Зондирование трещин ГРП в пластах с большей проницаемостью (порядка 1 Да), в которых происходит достаточно быстрое затухание импульсного сигнала даже в отсутствие трещин, вряд ли осуществимо.

Определенные в работе диапазон частот и длительность сканирующего импульса давления, а также выявленные различия значений фазовых скоростей и коэффициентов затухания при распространении импульсного сигнала в зазоре между корпусом зонда и стенкой скважины для пластов с трещиной ГРП или без нее могут быть использованы при создании системы контроля трещин ГРП в призабойной зоне скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пивень В. Ф.** Двумерная фильтрация в слоях переменной проводимости, моделируемой гармонической функцией координат // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1995. № 3. С. 102–112.
2. **Каневская Р. Д.** Математическое моделирование разработки месторождений нефти и газа с применением гидравлического разрыва пласта. М.: Недра, 1999.
3. **А. с. 1373023 SU, МПК Е 21 В 43/25 А1.** Способ воздействия на нефтяной пласт / М. Р. Мавлютов, В. Ф. Галиакбаров, В. Б. Штур, В. В. Прокшин, М. И. Кузнецов. № 3826843/03; Заявл. 19.12.1984. Оpubл. 20.08.2000.
4. **А. с. 1538587 SU, МПК Е 21 В 43/00 А2.** Гидродинамический пульсатор давления / В. Ф. Галиакбаров, Р. Х. Санников, М. Р. Мавлютов, Р. Р. Гилязетдинов, Ф. М. Казырбаев, Р. С. Тукаев. № 4263290/03; Заявл. 23.03.1987. Оpubл. 27.08.2000.
5. **Пат. 164573 RU, МПК Е 21 В 43/11 U1.** Устройство для обработки призабойной зоны пласта скважины / В. Ф. Галиакбаров, Э. В. Галиакбарова, К. М. Мустафин, С. Г. Зубаиров, Б. А. Яхин. № 2016110939/03; Заявл. 24.03.2016. Оpubл. 10.09.2016.
6. **Пат. 2640226 RU, МПК Е 21 В 43/25, 43/18, 5/42 C1.** Устройство для вызова пластового флюида и обработки скважины / М. Б. Бродский, В. Ф. Галиакбаров, Э. В. Галиакбарова, К. М. Мустафин, Б. А. Яхин. № 2016125619; Заявл. 27.06.2016. Оpubл. 27.12.2017.
7. **Желтов Ю. П., Христианович С. А.** О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта // Изв. АН СССР. Отд-ние техн. наук. 1955. № 5. С. 3–41.
8. **Чарный И. А.** Подземная гидрогазодинамика. М.: Гостоптехиздат, 1948.
9. **Баренблатт Г. И.** Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г. И. Баренблатт, В. М. Ентов, М. В. Рыжик. М.: Недра, 1984.

10. **Cinco-Ley H., Samaniego V. F.** Transient pressure analysis for fractured wells // J. Petroleum Technol. 1981. V. 33, N 9. P. 1749–1766.
11. **Шагапов В. Ш., Нагаева З. М.** К теории фильтрационных волн давления в трещине, находящейся в пористой проницаемой среде // ПМТФ. 2017. Т. 58, № 5. С. 121–130.
12. **Шагапов В. Ш., Нагаева З. М.** Гармонические волны давления в трещинах, находящихся в нефтяных и газовых пластах // Инж.-физ. журн. 2017. Т. 90, № 5. С. 1109–1117.
13. **Хабибуллин И. Л., Хисамов А. А.** К теории билинейного режима фильтрации в пластах с трещинами гидроразрыва // Вестн. Баш. гос. ун-та. 2018. Т. 23, № 4. С. 958–963.
14. **Qihong Feng, Tian Xia, Sen Wang, Harpreet Singh.** Pressure transient behavior of horizontal well with time-dependent fracture conductivity in tight oil reservoirs // Geofluids. 2017. V. 2017. 5279792. DOI: 10.1155/2017/5279792.
15. **Булатова З. А., Гумерова Г. А., Шагапов В. Ш.** Об эволюции акустических волн в каналах, имеющих участки с проницаемыми стенками и окруженных неоднородной пористой средой // Акуст. журн. 2002. Т. 48, № 3. С. 300–308.
16. **Шагапов В. Ш., Булатова З. А.** К теории локального акустического зондирования при-скважинных областей горных пород // ПМТФ. 2002. Т. 43, № 6. С. 142–150.
17. **Максимов Г. А., Радченко А. В.** Моделирование интенсификации нефтедобычи при акустическом воздействии на пласт из скважины // Акуст. журн. 2005. Т. 51. С. 118–131.
18. **Губайдуллин А. А., Болдырева О. Ю.** Волны в цилиндрической полости в насыщенной жидкостью пористой среде // Вестн. Нижегород. ун-та. 2011. № 4-3. С. 738–739.
19. **Пат. 2537419, МПК Е 21 В 43/26 С2.** Мониторинг гидравлического разрыва пласта / Х. Д. Джон, М. К. Магнус, Т. Патрик. № 2011153423/03; Заявл. 27.05.2010. Оpubл. 10.01.2015.
20. **Шагапов В. Ш., Галиакбарова Э. В., Хакимова З. Р.** К теории акустического сканирования трубопроводов с поврежденными участками // Тр. ин-та механики им. Р. Р. Мавлютова. 2016. Т. 11, № 2. С. 180–188.
21. **Шагапов В. Ш., Галиакбарова Э. В., Хусаинов И. Г., Хакимова З. Р.** Акустическое сканирование поврежденных трубопроводов, находящихся в грунте // ПМТФ. 2018. Т. 59, № 4. С. 169–178.
22. **Исакович М. А.** Общая акустика. М.: Наука, 1973.
23. **Тихонов А. Н.** Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. М.: Наука, 1977.
24. **Ефимов В. А.** Математический анализ (специальные разделы): В 2 ч. М.: Высш. шк., 1980. Ч. 1.
25. **Губайдуллин А. А., Болдырева О. Ю.** Компьютерное моделирование волновых процессов в пористых средах // Вестн. кибернетики. 2016. № 2. С. 103–111.

*Поступила в редакцию 14/X 2020 г.,
после доработки — 28/XII 2020 г.
Принята к публикации 25/I 2021 г.*