

УДК 532.529.534.2

АКУСТИЧЕСКОЕ СКАНИРОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В ГРУНТЕ

В. Ш. Шагапов, Э. В. Галиакбарова*, И. Г. Хусаинов**,
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

** Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,
453103 Стерлитамак, Россия

E-mails: Shagapov@rambler.ru, emi.galiakbar@yandex.ru, kig10@mail.ru,
zulfya.hakimova@yandex.ru

Исследуется динамика импульсного сигнала, распространяющегося в подземном трубопроводе с поврежденным участком. Рассматриваются волны давления, распространяющиеся по линейному трубопроводу, заполненному флюидом. Вследствие наличия вязкого трения и теплопроводности диссипация учитывается в тонком слое жидкости или газа вблизи стенки. Принято, что участок трубопровода с повреждением является отражающей поверхностью. Условия на этой поверхности получены в предположении, что интенсивность утечки жидкости при прохождении волны через поврежденный участок определяется проницаемостью грунта. Показано, что в слабопроницаемых грунтах сигнал не позволяет получить полную информацию о повреждениях, а в хорошо проницаемых грунтах для выявления повреждений можно использовать только короткие (высокочастотные) импульсные сигналы.

Ключевые слова: импульс, трубопровод, жидкость, газ, фильтрация, грунт.

DOI: 10.15372/PMTF20180420

Введение. Эксплуатация магистральных трубопроводов обуславливает необходимость диагностики их технического состояния. С использованием методов акустического сканирования трубопроводов при распространении по ним импульсов можно получить информацию о поврежденном участке. Теория акустического сканирования труб обсадных колонн нефтяных и газовых скважин представлена в работах [1–5], наземных трубопроводов — в работе [6]. В [7–10] показано, что с помощью интеллектуальной системы контроля [11, 12] можно определить утечку в трубопроводе на ранних стадиях падения давления по форме импульсов, отраженных от поврежденного участка.

В настоящей работе исследуется динамика акустического импульса в подземном трубопроводе, заполненном жидкостью или газом и имеющем поврежденный участок.

1. Основные уравнения. Пусть горизонтальный полубесконечный трубчатый канал (трубопровод), окруженный пористой средой, содержит поврежденный участок в виде си-

Работа выполнена в рамках государственного задания на 2017–2019 гг. (№ 0246-2018-0002) и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-41-020244).

© Шагапов В. Ш., Галиакбарова Э. В., Хусаинов И. Г., Хакимова З. Р., 2018

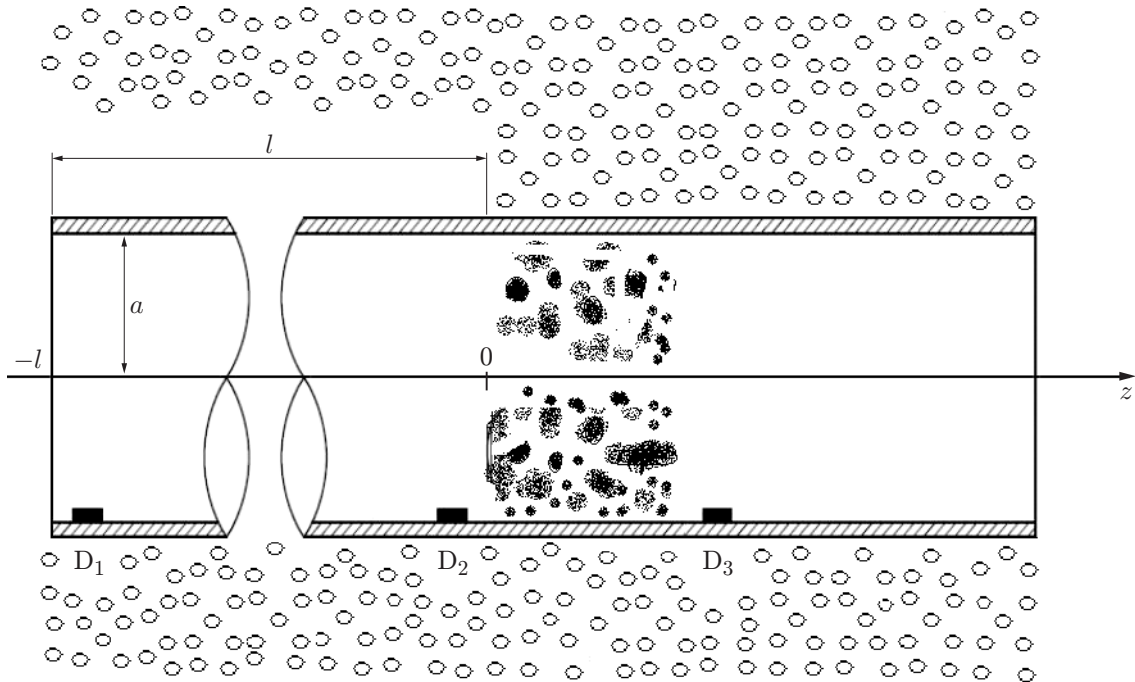


Рис. 1. Схема трубы с поврежденным участком

стемы щелей или пробоин (рис. 1), распределенных по всей его стенке. Примерами таких повреждений, в частности, могут быть разрушения металлических труб вследствие коррозии. В исходном состоянии давление p_a вне канала является нормальным атмосферным, сам канал заполнен газом или жидкостью, давление которых равно $p_0 = p_a$. На внутренней поверхности вблизи входного отверстия трубы расположен приемник сигнала D_1 , вблизи поврежденного участка — приемники D_2, D_3 акустических сигналов.

Примем следующие предположения: 1) возмущение давления распространяется вдоль оси трубчатого канала с длиной волны λ , значительно превышающей протяженность поврежденного участка Δ_l ($\lambda \gg \Delta_l$); 2) длина волны больше диаметра канала ($\lambda > 2a$) [13]; 3) влияние сил вязкости и теплопроводности проявляется лишь в тонком пограничном слое вблизи стенок канала. Поэтому в случае гармонических волн выполняется неравенство $a \gg 2\sqrt{\nu^{(j)}/\omega}$, где $\nu^{(j)}$ — температуропроводность ($j = T$) и кинематическая вязкость ($j = \mu$) флюида (газа или жидкости); ω — круговая частота [6].

Согласно первому допущению распределение давления на поврежденном участке является однородным. Полагается, что поврежденный участок представляет собой отражающую поверхность.

Из уравнения неразрывности, первого начала термодинамики и уравнения теплопроводности газа вблизи стенки трубопровода на участках $l < z < 0$ и $0 < z < \infty$ (см. рис. 1) следует уравнение [6]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(p + 2 \frac{\sqrt{\nu^{(T)}} (\gamma - 1)}{a\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^t \frac{p(z, \tau)}{\sqrt{t - \tau}} d\tau \right) + \rho_0 C^2 \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$C = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_0}}, \quad \gamma = \frac{c_g}{c_g - R_g}, \quad \nu^{(T)} = \frac{\lambda_g}{\rho_0 c_g},$$

где p — возмущение давления; γ — показатель адиабаты газа; ρ_0 — невозмущенное значение плотности; C — адиабатическая скорость звука в газе; w — возмущение скорости;

c_g, R_g, λ_g — теплоемкость при постоянном давлении, приведенная газовая постоянная и теплопроводность газа соответственно.

В том случае, если флюид представляет собой жидкость, теплопереносом между ним и стенкой трубопровода можно пренебречь и вместо (1) использовать уравнение

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 C^2 \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

где C — скорость звука в жидкости.

Помимо теплопереноса на распространение сигналов в трубопроводе оказывают влияние процессы диссипации энергии, обусловленные наличием внутреннего трения (вязкости), которое проявляется лишь в тонком пограничном слое вблизи стенки трубопровода. Уравнение, описывающее распространение слабых волн, с учетом сил вязкого трения о стенки трубопровода имеет вид [14]

$$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{2\sigma}{a}, \quad \sigma = \frac{\mu}{\sqrt{\pi\nu^{(\mu)}}} \int_{-\infty}^t \frac{\partial w // \partial \tau}{\sqrt{t - \tau}} d\tau, \quad \nu^{(\mu)} = \frac{\mu}{\rho_0}, \quad (3)$$

где σ — касательное напряжение на стенке канала.

Уравнения (1), (2) с учетом (3) представляют собой систему интегродифференциальных уравнений для p и w на участках $-l < z < 0$ и $0 < z < \infty$. Решения этих уравнений на двух указанных участках (на поврежденном участке, который принимается в качестве отражающей поверхности с координатой $z = 0$) должны удовлетворять условиям равенства давлений и условию, следующему из законов сохранения массы:

$$\pi a^2 \rho_0 (w^{(1)} - w^{(2)})|_{z=0} = \rho_0 s u^*. \quad (4)$$

Здесь верхние индексы в скобках $j = 1, 2$ обозначают возмущения давления p и скорости w на участках $-l < z < 0$ и $0 < z < \infty$ соответственно; s — площадь поврежденного участка, через который происходит истечение флюида из трубопровода или его поступление из грунта; u^* — среднерасходная скорость истечения ($u^* > 0$) или поступления ($u^* < 0$) флюида.

Условие, представляющее собой равенство возмущений давления при прохождении сигнала через поврежденный участок, имеет вид

$$p^{(1)}|_{z=0} = p^{(2)}|_{z=0} = p^*, \quad (5)$$

где p^* — возмущение давления на отражающей границе.

Будем полагать, что интенсивность истечения потока из поврежденного участка определяется гидравлическим сопротивлением грунта. При этом характерная глубина, на которую распространяются фильтрационные возмущения в грунте при отражении волн от поврежденного участка, значительно меньше длины этого участка. Поэтому для случая фильтрации жидкости или газа в грунте можно записать основные уравнения нестационарной фильтрации [13] в плоскоодномерном приближении

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = \nu^{(p)} \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2}, \quad \nu^{(p)} = \frac{k'_G \rho_0 C^2}{m'_G \mu}. \quad (6)$$

Здесь $\nu^{(p)}$ — коэффициент пьезопроводности грунта; x — координата, отсчитываемая от стенки канала ($0 < x < \infty$); k'_G, m'_G — коэффициенты проницаемости и пористости пласта.

Скорость фильтрации u' связана с возмущением давления p' в грунте законом Дарси

$$u' = -\frac{k'_G}{\mu} \frac{\partial p'}{\partial x}. \quad (7)$$

На стенке трубы ($x = 0$) для этих величин должны выполняться граничные условия

$$u' = u^*, \quad p' = p^*. \quad (8)$$

Пусть при $t < t_0$ жидкость (или газ) в трубе и грунте находится в состоянии равновесия. Тогда для скорости и возмущения давления в канале и грунте можно записать

$$w = u' = u^* = 0, \quad p = p' = p^* = 0 \quad (t < t_0). \quad (9)$$

Согласно принципу Дюамеля [14] решение уравнения (6), удовлетворяющее условиям (8), (9), при $t = -\infty$ имеет вид

$$p' = \int_{-\infty}^t \frac{\partial U(x, t - \tau)}{\partial t} p^*(\tau) d\tau, \quad U(x, t - \tau) = \frac{2}{\sqrt{3}} \int_{x/\sqrt{4\nu^{(p)}(t-\tau)}}^{\infty} e^{-\alpha^2} d\alpha. \quad (10)$$

На основе закона Дарси (7) с использованием решения (10), в котором полагается $x = 0$, можно получить зависимость между скоростью u^* и давлением p^* в грунте вблизи поврежденной поверхности

$$u^* = \frac{k_G}{\mu} \int_{-\infty}^t \frac{\partial p^*(\tau)}{\partial \tau} \frac{d\tau}{\sqrt{\pi\nu^{(p)}(t-\tau)}}. \quad (11)$$

Следует отметить, что принятая схема учета утечек из поврежденного участка при распространении волн в канале неприменима, если повреждения представляют собой мелкие трещины на стенках канала или сварные швы являются некачественными.

Из условия существования решения системы (1)–(3) в виде затухающих гармонических волн на участках $-l < z < 0$ и $0 < z < \infty$

$$p = A_p \exp [i(Kz - \omega t)], \quad w = A_w \exp [i(Kz - \omega t)], \quad i = \sqrt{-1}$$

($K = k + i\delta$ — волновой вектор; A_p, A_w — амплитуды возмущений давления и скорости) следует дисперсионное соотношение [6]

$$K = \pm \frac{\omega}{C} \sqrt{\left(1 + 2 \frac{\gamma - 1}{y^{(T)}}\right) \left(1 + \frac{1}{y^{(\mu)}}\right)}. \quad (12)$$

Здесь $y^{(j)} = \sqrt{-i\omega a^2/\nu^{(j)}}$ ($j = T, \mu$); знаки “+” и “-” соответствуют волнам, распространяющимся слева направо и справа налево. Заметим, что величины $a_{(\omega)}^{(j)} = \sqrt{\nu^{(j)}/\omega}$ ($j = T, \mu$) представляют собой характерную глубину проникания температурных и поперечных волн в вязкой жидкости [15].

В случае если трубопровод заполнен жидкостью, используя вместо (1) более простое уравнение (2), имеем

$$K = \pm \frac{\omega}{C} \sqrt{1 + \frac{1}{y^{(\mu)}}}. \quad (13)$$

Согласно одному из основных допущений о малой толщине слоев вблизи стенки трубопровода, где имеют место перепады температуры и скорости по течению, принятая система уравнений (1), (3) и полученное на ее основе дисперсионное уравнение (12) справедливы при $a_{(\omega)}^{(j)} \ll a$. Поэтому в области применимости дисперсионного уравнения (12) должны выполняться неравенства $|y^{(j)}| \gg 1$, $1/|y^{(j)}| \leq 1$ ($j = T, \mu$).

Следовательно, низкочастотная ветвь кривой дисперсионной зависимости (12) находится за границей области применимости теоретической модели.

2. Условия на отражающей поверхности. На рис. 1 ось z совпадает с осью трубопровода, началом отсчета ($z = 0$) является отражающая поверхность, на участках $-l < z < 0$ и $0 < z < \infty$ распространяются отраженный и прошедший сигналы соответственно.

Решение задачи о гармонических волнах на отражающей поверхности будем искать в виде

$$p^* = A_p^* \exp(-i\omega t), \quad u^* = A_u^* \exp(-i\omega t), \quad (14)$$

где A_p^* , A_u^* — амплитуды возмущений давления и скорости соответственно.

Как отмечено выше, интенсивность утечки через поврежденный участок трубы определяется фильтрационными характеристиками грунта. Подставляя (14) в (11), после несложных преобразований получаем

$$A_u^* = \frac{k_G}{\mu a} y^{(p)} A_p^*, \quad y^{(p)} = \sqrt{-\frac{i\omega a^2}{\nu^{(p)}}}.$$

Из условий (4), (5) для амплитуд падающей $A_p^{(O)}$, отраженной $A_p^{(R)}$ и проходящей $A_p^{(G)}$ волн при $z = 0$ находим

$$A_p^{(O)} - A_p^{(R)} - A_p^{(G)} = S y^{(p)} m_G \nu^{(p)} A_p^{(G)} / (C a), \quad A_p^{(G)} = A_p^*, \\ A_p^{(O)} + A_p^{(R)} = A_p^{(G)}, \quad S = s / (\pi a^2).$$

Здесь учтено, что для рассматриваемых волн должно выполняться условие $|y^{(j)}| \gg 1$ ($j = T, \mu$). Следовательно, для коэффициентов отражения $N = A_p^{(R)} / A_p^{(O)}$ и прохождения $M = A_p^{(G)} / A_p^{(O)}$ получаем

$$M = \frac{2}{2 + S \sqrt{-i\omega / \omega_*}}, \quad \omega_* = \frac{\nu^{(\mu)}}{k_G m_G}, \quad N = M - 1.$$

Коэффициенты отражения и прохождения зависят от частоты ω , поэтому в процессе отражения и прохождения происходит дисперсия импульсного сигнала. Характерную частоту ω_* будем называть пороговой.

На рис. 2 представлены зависимости модуля и аргумента коэффициента отражения гармонической волны от частоты. В качестве жидкости рассматривалась вода ($\rho_0 = 10^3$ кг/м³, $C = 1,5 \cdot 10^3$ м/с, $\mu = 10^{-3}$ Па·с), коэффициент пористости грунта принят равным $m_G = 0,2$. Здесь и далее радиус канала полагается равным $a = 10^{-1}$ м, безразмерная площадь поврежденного участка трубопровода $S = 1$. Из рис. 2 следует, что с уменьшением проницаемости грунта уменьшается модуль коэффициента отражения. В частности, при $k_G = 10^{-11}$ м² максимальное значение амплитуды в рассматриваемом диапазоне частот составляет не более 20 % амплитуды падающей волны ($|N| \leq 0,17$). Следовательно, в слабопроницаемых грунтах информативность отраженного сигнала мала. Заметим также, что с ростом частоты возмущений ω модуль коэффициента отражения увеличивается, т. е. информативность коротких сигналов возрастает. Вместе с тем короткие сигналы быстрее затухают при распространении волн по трубопроводу. Поэтому в случае достаточно протяженных трубопроводов короткие сигналы могут не донести информацию о поврежденном участке.

На рис. 3 показано влияние параметра S на зависимость коэффициента отражения от частоты. Для проницаемости грунта принято значение $k_G = 10^{-9}$ м², остальные параметры те же, что и для рис. 2. На рис. 3 видно, что при $S = 10^{-1}$ во всем рассмотренном

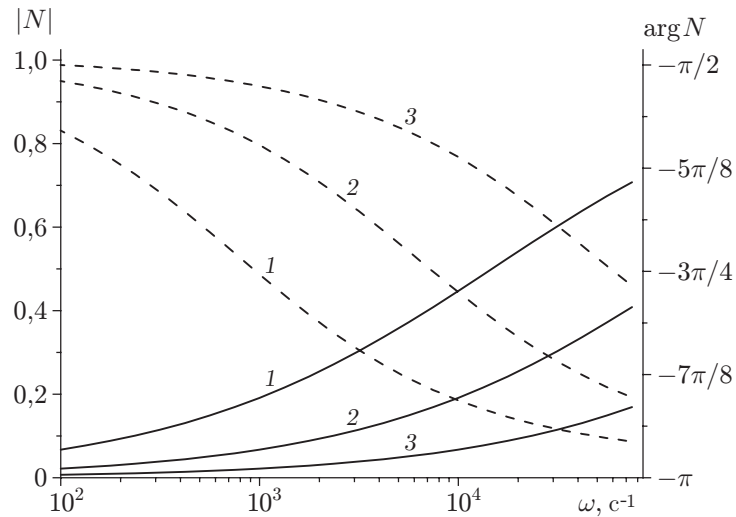


Рис. 2. Зависимости модуля (сплошные линии) и аргумента (штриховые линии) коэффициента отражения в канале ($a = 10^{-1}$ м), содержащем воду, от частоты ($m_G = 0,2$, $S = 1$) при различных значениях коэффициента проницаемости и пороговой частоты:

1 — $k_G = 10^{-9}$ м², $\omega_* = 5 \cdot 10^3$ с⁻¹; 2 — $k_G = 10^{-10}$ м², $\omega_* = 5 \cdot 10^4$ с⁻¹; 3 — $k_G = 10^{-11}$ м², $\omega_* = 5 \cdot 10^5$ с⁻¹

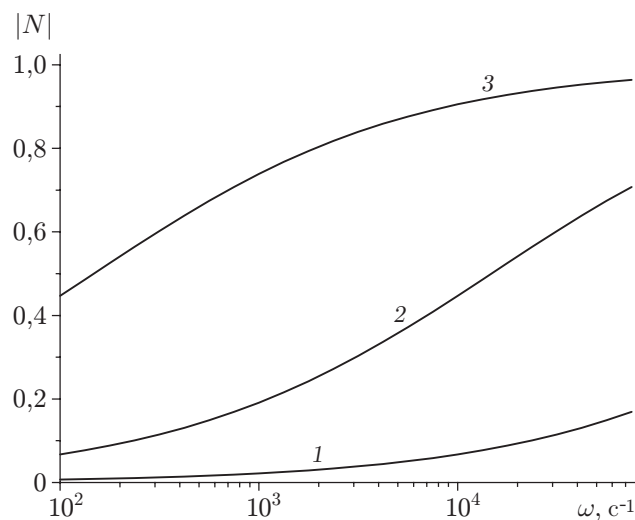


Рис. 3. Зависимость модуля коэффициента отражения в канале, содержащем воду, от частоты ($m_G = 0,2$, $k_G = 10^{-9}$ м²) при различных значениях относительной площади поврежденного участка:

1 — $S = 10^{-1}$, 2 — $S = 1$, 3 — $S = 10$

диапазоне частот модуль коэффициента отражения близок к нулю. Следовательно, при малых значениях S (согласно расчетам $S \leq 10^{-1}$) повреждения трубопровода практически невозможно обнаружить методом акустического зондирования.

3. Эволюция импульсных сигналов. Пусть импульсный сигнал генерируется источником, находящимся вблизи торца канала. Поврежденный участок расположен на некотором неизвестном расстоянии l от передающего и принимающего сигнал датчика D_1 . Распространяющийся по каналу сигнал, достигая поврежденного участка, частично отражается, а частично проходит дальше. Достигшие поврежденного участка отраженный и прошедший сигналы фиксируются датчиками D_2 и D_3 . При этом отраженный сигнал передает информацию о поврежденном участке, а также о характере и масштабах повреждений. Пусть через левую границу трубопровода ($z = -l$) передается сигнал $p = \tilde{p}^{(O)}(t)$ конечной длительности с характерной временной протяженностью Δt . При этом полагаем, что пространственная протяженность этого сигнала вдоль канала $\Delta z = C \Delta t$ значительно меньше расстояния l .

Используя преобразование Фурье и программу быстрого преобразования для численной реализации [16], для сигнала, достигшего датчика D_2 , можно получить выражение

$$p^{(O)}(0, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}^{(O)}(\tau) e^{iK(\omega)l} e^{i\omega(t-\tau)} d\omega d\tau.$$

Аналогичные соотношения можно записать для отраженного от границы и прошедшего через границу $z = 0$ импульсов:

$$p^{(R)}(0, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}^{(O)}(\tau) N(\omega) e^{i\omega(t-\tau)} d\omega d\tau,$$

$$p^{(G)}(0, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}^{(O)}(\tau) M(\omega) e^{i\omega(t-\tau)} d\omega d\tau.$$

Для сигнала, возвратившегося к датчику D_1 , имеем

$$\tilde{p}^{(E)}(-l, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p^{(R)}(0, \tau) e^{iK(\omega)l} e^{i\omega(t-\tau)} d\omega d\tau.$$

В качестве исходного сигнала выберем сигнал колоколообразной формы с амплитудой Δp :

$$\tilde{p}^{(O)} = \Delta p_0 \exp\left(-\left(\frac{t-t_0}{\Delta t/6}\right)^2\right).$$

На рис. 4 приведены расчетные осциллограммы, показывающие эволюцию волнового импульса ($\Delta t = 2 \cdot 10^{-2}$ с) в трубе радиусом $a = 10^{-1}$ м, заполненной водой. Окружающая канал пористая среда ($k_G = 10^{-10}$ м², $m_G = 0,2$) является однородной, относительная площадь поврежденного участка равна $S = 5, 10$ ($s = 0,15; 0,30$ м² соответственно).

Первый всплеск на осциллограмме для датчика D_1 соответствует исходному импульсу, испускаемому на расстоянии $l = 10^3$ м от поврежденного участка. Этот импульс достигает поврежденного участка с меньшей амплитудой вследствие вязкостной и тепловой диссипации (первый всплеск на осциллограмме для датчика D_2). Второй всплеск

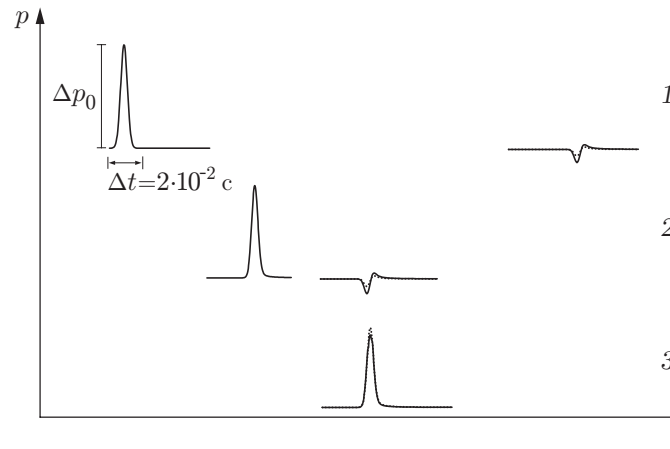


Рис. 4. Расчетные осциллограммы эволюции импульсного сигнала, поступающего от поврежденного участка ($l = 10^3$ м) в канале, заполненном водой, при различных значениях относительной площади поврежденного участка: пунктирные линии — $S = 1$, сплошные — $S = 5$; 1–3 — сигналы, принимаемые датчиками D_1, D_2, D_3

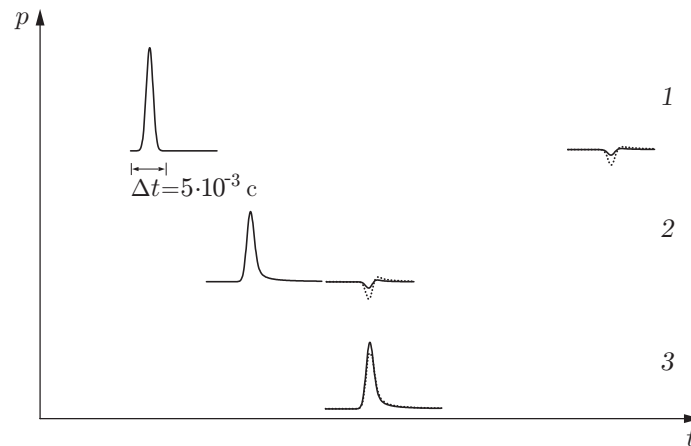


Рис. 5. Расчетные осциллограммы эволюции импульсного сигнала, поступающего от поврежденного участка ($l = 3 \cdot 10^2$ м) в канале, содержащем нефть, при различных значениях коэффициента проницаемости: сплошные линии — $k_G = 10^{-11}$ м², пунктирные — $k_G = 10^{-10}$ м²; 1–3 — сигналы, принимаемые датчиками D_1, D_2, D_3

на осциллограмме для датчика D_2 соответствует отраженному от поврежденного участка сигналу. Далее отраженный сигнал возвращается к датчику D_1 (второй всплеск на осциллограмме для датчика D_1), прошедший через поврежденный участок импульсный сигнал распространяется в трубе за этим участком (всплеск на осциллограмме для датчика D_3). Результаты анализа представленных расчетных осциллограмм свидетельствуют о возможности оценки с помощью метода акустического зондирования расстояния до поврежденного участка и масштабов повреждений при известных значениях параметров грунта (проницаемости и пористости).

На рис. 5 представлены расчетные осциллограммы для импульсного сигнала ($\Delta t = 5 \cdot 10^{-3}$ с), показывающие влияние проницаемости грунта. В качестве флюида принята

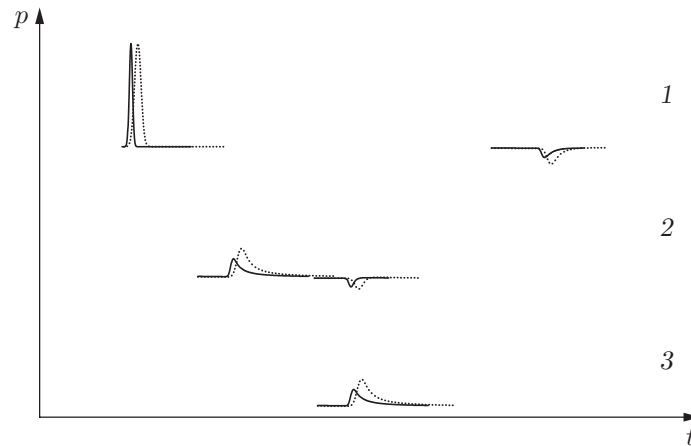


Рис. 6. Расчетные осциллограммы эволюции импульсного сигнала, поступающего от поврежденного участка в канале ($l = 5 \cdot 10^2$ м), содержащем воздух, при различных значениях характерной временной протяженности: сплошные линии — $\Delta t = 2 \cdot 10^{-2}$ с, пунктирные — $\Delta t = 4 \cdot 10^{-2}$ с; 1-3 — сигналы, принимаемые датчиками D_1, D_2, D_3

нефть ($\rho_0 = 890$ кг/м³, $C = 1225$ м/с, $\mu = 2 \cdot 10^{-2}$ Па·с). Окружающая канал пористая среда ($m_G = 0,2$) является однородной, относительная площадь поврежденного участка $S = 10$. На рис. 5 видно, что в случае слабопроницаемых грунтов акустический сигнал, распространяющийся по трубчатому каналу с нефтью (так же как и с водой), является недостаточно информативным. Сигнал, отраженный от поврежденного участка, очень слабый.

На рис. 6 показано влияние временной протяженности исходного сигнала на его эволюцию. В качестве флюида принят воздух ($\rho_0 = 1,29$ кг/м³, $C = 340$ м/с, $\mu = 1,85 \cdot 10^{-5}$ Па·с). Относительная площадь поврежденного участка равна $S = 20$, коэффициент проницаемости $k_G = 10^{-10}$ м². Несмотря на то что короткий отраженный сигнал слабее более длинного отраженного сигнала, его форма искажается в меньшей степени. Поэтому при диагностике повреждений более предпочтительно использовать короткие импульсные сигналы. Разрешающая способность принимающего датчика (датчика D_1) налагает ограничение на длину сканируемого участка трубчатого канала.

С использованием представленных в работе [6] зависимостей декремента затухания от частоты импульсного сигнала, рассчитанных по дисперсионным соотношениям (12), (13) для каналов различного диаметра, заполненных различными флюидами, можно оценить максимальную длину диагностируемого линейного участка трубчатого канала с учетом разрешающей способности датчиков.

Заключение. Таким образом, в трубчатых каналах, окруженных слабопроницаемыми грунтами, импульсный сигнал не позволяет получить полную информацию о поврежденных участках. В каналах, окруженных хорошо проницаемыми грунтами, для выявления повреждений можно использовать короткие сигналы. Максимальную длину диагностируемого участка канала можно оценить по зависимости декремента затухания от частоты импульсного сигнала, рассчитанной по дисперсионным соотношениям для конкретных геометрических и физических параметров канала.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Biot M. A.** Propagation of elastic waves in a cylindrical bore containing a fluid // J. Appl. Phys. 1952. V. 23, N 9. P. 497–509.
2. **Shagapov V. Sh., Khlestkina N. M., Lhuillier D.** Acoustic waves in channels with porous and permeable walls // Transport Porous Media. 1999. V. 35, N 3. P. 327–344.
3. **Булатова З. А., Гумерова Г. А., Шагапов В. Ш.** Об эволюции волн в каналах, имеющих участки с проницаемыми стенками и окруженных неоднородной пористой средой // Акуст. журн. 2002. Т. 3. С. 23–31.
4. **Шагапов В. Ш., Булатова З. А., Щеглов А. В.** К возможности акустического зондирования газовых скважин // Инж.-физ. журн. 2007. Т. 80, № 4. С. 118–126.
5. **Nigmatulin R. I., Gubaydullin A. A., Shagapov V. Sh.** Numerical investigation of shock and thermal waves in porous saturated medium with phase transitions // Proc. of the Intern. conf. “Porous media: Physics, models, simulation”, Moscow, 19–21 Nov. 1997. Singapore etc.: World Sci. Publ., 1999. P. 15–21.
6. **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.
7. **Галиакбарова Э. В., Галиакбаров В. Ф.** Импульсное сканирование нефтепроводов для обнаружения утечек // Пробл. сбора, подготовки и транспорта нефтепродуктов. 2012. № 3. С. 162–168.
8. **Галиакбарова Э. В.** Волновые исследования нефтепродуктопроводов для обнаружения “утечек” // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10, № 2. С. 44–49.
9. **Галиакбарова Э. В., Галиакбаров В. Ф., Каримов М. С.** Теоретические аспекты для организации мониторинга давления в газопроводной системе для поддержания пожарной и промышленной безопасности // Нефтегазовое дело. 2014. Т. 12, № 3. С. 140–146.
10. **Галиакбарова Э. В., Бахтизин Р. Н., Галиакбаров В. Ф. и др.** Использование энергии потоков для диагностики магистральных газопроводов с использованием интеллектуальной системы контроля // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14, № 2. С. 104–113.
11. **Пат. 2197679 С 2 РФ, МКИ F 17 D 5/02.** Способ определения места утечки жидкости из трубопровода / В. Ф. Галиакбаров, А. А. Гольянов, Г. Е. Коробков. Оpubл. 27.01.2003, Бюл. № 3.
12. **Пат. 2606719 С 1 РФ, МКИ F 17 D 5/00.** Система контроля состояния трубопровода / В. Ф. Галиакбаров, Э. В. Галиакбарова, В. Д. Ковшов, Ф. М. Аминев, З. Р. Хакимова. Оpubл. 10.01.2017, Бюл. № 1.
13. **Исакович М. А.** Общая акустика. М.: Наука, 1973.
14. **Ландау Л. Д.** Теоретическая физика: В 10 т. Т. 6. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Наука, 1986.
15. **Кочин Н. Е.** Теоретическая гидродинамика: В 2 ч. / Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. М.: Физматгиз, 1963. Ч. 2.
16. **Ефимов В. А.** Математический анализ (специальные разделы): В 2 ч. Ч. 1. Общие функциональные ряды и их приложение. М.: Высш. шк., 1980.

*Поступила в редакцию 23/V 2017 г.,
в окончательном варианте — 18/IX 2017 г.*