

На правах рукописи

ЩЕГЛОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

ДИНАМИКА АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В КАНАЛАХ
С ПЕРФОРИРОВАННЫМИ СТЕНКАМИ

01.02.05 Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень–2007

Работа выполнена на кафедре прикладной математики и механики Стерлитамакской государственной педагогической академии.

Научный руководитель: член-корр. АН РБ, доктор физико-математических наук, профессор
Шагапов Владислав Шайхулагзамович;
Консультант: кандидат физико-математических наук
Булатова Зульфия Абдурахмановна
Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Урманчиев Саид Федорович
кандидат физико-математических наук Болдырева Ольга Юрьевна
Ведущая организация: Башкирский государственный университет

Защита диссертации состоится «23» мая 2007г. в 16 час. на заседании диссертационного совета ДМ-212.274.09 в Тюменском государственном университете по адресу: г. Тюмень, ул.Перекопская, 15А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета

Автореферат разослан «__» апреля 2007г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук

А.В. Татосов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для улучшения коллекторских характеристик призабойной зоны нефтяных и газовых пластов используются различные физико-химические, а также гидродинамические и волновые способы обработки. Представляется, что одним из эффективных способов оперативного контроля состояния призабойной зоны скважин до и после обработки являются акустические методы, основанные на особенностях отражения и прохождения сигналов на границах участков каналов (скважин) с различной проницаемостью стенок.

Исследование волновых процессов в каналах, содержащих перфорированные проницаемые участки и построение теоретических моделей происходящих при этом процессов, применяются в горном и взрывном деле. Проблемы связаны в бурении с решением практических задач поиска, разведки и эксплуатации нефтяных и газовых скважин: оценки пористости и проницаемости пород, определение качества вскрытия перфорированного участка. Практическая задача зондирования прискважинных областей акустическими волнами дает возможность контроля состояния призабойной зоны пластов и выявления осложнений в процессе эксплуатации нефтяных и газовых скважин.

Целью работы является теоретическое исследование нестационарных волновых процессов в цилиндрических скважинах с перфорированными стенками и в проницаемых участках, окруженных пористой средой; анализ особенностей распространения и затухания гармонических волн, волновых пакетов в скважине с проницаемым и перфорированным участками; исследование процессов отражения и прохождения гармонических волн через границу проницаемого и перфорированного участков цилиндрической скважины, окруженной пористой средой; исследование процессов отражения длинных волн на участке скважины с перфорированной проницаемой стенкой.

Научная новизна работы состоит в исследовании распространения и затухания гармонических волн и волновых пакетов в цилиндрических газовых скважинах, с учетом вязкости и теплопроводности газа, содержащих участки с перфорированными стенками и в проницаемых участках, окруженных однородной пористой средой; исследовании прохождения и отражения гармонических волн и волновых пакетов на границе перфорированного участка стенки цилиндрической скважины, окруженной пористой средой; оценке влияния на эволюцию волн вязкости и теплопроводности газа, а так же параметров перфорации.

Практическая ценность работы заключается в установлении закономерностей распространения и затухания гармонических волн и волновых пакетов в цилиндрической газовой скважине с пористыми перфорированными стенками и проницаемых участках,

окруженных однородной пористой средой; а также закономерностей при отражении длинных волн от границы проницаемого участка цилиндрической газовой скважины, в установлении качественных особенностей динамики волн в зависимости от состояния пористой среды вокруг скважины, в случае дистанционного и локального способа контроля; работа может служить теоретической основой для определения коллекторских характеристик призабойной зоны пластов и прогнозирования возможных осложнений в процессе эксплуатации газовых скважин с помощью волновых методов.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных исходных моделей, с согласованием с современными физическими представлениями, согласованием в предельных ситуациях новых уравнений с ранее известными, сопоставлением численных результатов с результатами других исследователей.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на международной школе-семинаре по вопросам теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей (Екатеринбург, 2006); на международной научно-технической конференции ТГНУ (2005); на всероссийских конференциях СГПА (Стерлитамак, 2004), БГСПА (Бирск, 2006), НБГУ (Нефтекамск, 2006); на региональных конференциях БГУ (Уфа, 2005), БГСПА (Бирск, 2004, 2005), на научных семинарах кафедры прикладной математики и механики СГПА и на научном семинаре Института механики г.Уфы и опубликованы в 12 работах.

Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю чл.-корр. АН РБ Шагапову В.Ш., а также кандидату физико-математических наук Булатовой З.А. за постоянное внимание, помощь и поддержку в работе.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, состоящего из 118 наименований. Работа изложена на 135 страницах и иллюстрирована 51 рисунками.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и кратко изложена структура диссертации.

В первой главе выполнен обзор теоретических и экспериментальных исследований волн давления в заполненных жидкостью или газом каналах, имеющих проницаемые стенки и зоны фильтрации, а также обзор работ по акустическому зондированию открытых прискважинных областей проницаемых горных пород.

Во второй главе представлены результаты исследования эволюции гармонических волн и волновых пакетов в цилиндрической скважине, имеющей участок с проницаемыми стенками и окруженный пористой проницаемой средой.

При составлении теоретической модели дистанционного способа акустического контроля приняты следующие допущения:

– скважина и несжимаемый скелет окружающего ее пористого пространства заполнены одним и тем же газом (в данной работе используется метан);

– вязкость и теплопроводность проявляются лишь в тонком пограничном слое вблизи твердой стенки скважины при распространении волновых возмущений;

– акустический сигнал распространяется вдоль оси скважины, а протяженность импульса λ в канале значительно меньше длины проницаемого донного участка h_2 ($\lambda \ll h_2$);

– сжатие и растяжение газа при распространении возмущений в скважине происходит в режиме, близком к адиабатическому.

Так как в работе рассматриваются возмущения, характерная длительность которых значительно меньше времени их распространения по участку с проницаемыми и непроницаемыми стенками, то процесс эволюции таких возмущений можно разбить на отдельные этапы, характерные для распространения возмущений по обсаженному и необсаженному участкам соответственно. Кроме того, необходимо отдельно учесть процесс перехода волновых сигналов через границу между этими участками.

Для распространения акустических волн в обсаженном участке скважины представлены следующие уравнения:

– уравнение неразрывности с учетом теплопроводности газа

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(p + 2 \frac{\sqrt{\nu^T} (\gamma - 1)}{a \sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^t \frac{p(z, \tau')}{\sqrt{t - \tau'}} d\tau' \right) + \rho_0 C^2 \frac{\partial w}{\partial z} = 0, C = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}}, \gamma = \frac{c_g}{c_g - R_g}, \nu^T = \frac{\lambda_g}{\rho_0 c_g} \quad (1)$$

– уравнение импульсов, с учетом сил вязкого трения о стенки скважины

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

Здесь ρ –плотность среды; w –скорость среды; C –скорость звука в газе; p –давление в скважине; γ –показатель адиабаты газа; q –поток тепла, отнесенный на единицу площади стенки скважины; a –радиус скважины; ν^T –коэффициент температуропроводности газа; c_g –удельная теплоемкость газа при постоянном давлении; R_g –приведенная газовая постоянная; λ_g –коэффициент теплопроводности; τ –касательное вязкостное напряжение на внутренней поверхности стенки канала, которое может быть определено из соотношения

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

где μ_g –динамическая вязкость газа; ν^μ –кинематическая вязкость газа. Нижний индекс 0 параметра соответствует невозмущенному значению этого параметра.

Уравнение сохранения массы на открытом участке ($0 < z < h_2$) в линеаризованном приближении может быть записано как

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{2\rho_0}{a}u, \quad (3)$$

где u –скорость фильтрации акустической волны через стенку скважины.

Уравнение импульса на участке ($z > 0$) может быть представлено в виде (2), при этом действием вязкостных напряжений будем пренебрегать ($\tau = 0$).

Для описания интенсивности процесса фильтрации газа в окружающее пористое пространство ($0 < z < h_2, r > a$) при прохождении волны через участок с проницаемыми стенками примем уравнение импульсов с учетом инерционных эффектов:

$$\rho_0 \frac{\partial u^{(1)}}{\partial t} = -m^{(1)} \frac{\partial p^{(1)}}{\partial r} - \frac{m^{(1)}\mu_g}{k^{(1)}}u^{(1)}, \quad (4)$$

а так же уравнение неразрывности:

$$m^{(1)} \frac{\partial p^{(1)}}{\partial t} + \frac{\rho_0}{r} \frac{\partial (ru^{(1)})}{\partial r} = 0, r > a, \quad (5)$$

где $u^{(1)}$ –скорость фильтрации в пористом пространстве вокруг скважины; $m^{(1)}$ –пористость окружающего скважину пространства; $p^{(1)}$ –давление в пористой насыщенной среде вокруг скважины; $k^{(1)}$ –коэффициент проницаемости окружающего канал пространства; r –горизонтальная координата.

Граничные условия на стенке канала ($r = a$) для уравнений (4) и (5) могут быть записаны в виде:

$$u(1) = u; p^{(1)} = p, r = a. \quad (6)$$

Когда канал окружен пористым пространством бесконечной толщины (фильтрационные процессы при распространении возмущений происходят в слоях, толщина которых значительно меньше толщины пористого пространства вокруг канала), систему уравнений необходимо дополнить граничным условием:

$$p^{(1)} = 0(r \rightarrow \infty). \quad (7)$$

На границе ($z = 0$), разделяющей обсаженный и проницаемые участки скважины, справедливы соотношения, вытекающие из условия непрерывности давления и неразрывности среды:

$$p^{(O)} + p^{(R)} = p^{(G)}, w^{(O)} + w^{(R)} = w^{(G)}. \quad (8)$$

Верхние индексы (O), (R) и (G) в (8) соответствуют значениям возмущений в падающей, отраженной и прошедшей волнах соответственно.

На основании системы уравнений и граничных условий получены выражения для коэффициентов отражения и прохождения волны через проницаемый участок скважины, а также дисперсионное уравнение.

На рис. 1 и 2 приведены расчетные осциллограммы, иллюстрирующие эволюцию волнового сигнала (при различных давлениях газа: $T = 380$ К; $1-p = 10^6$ Па, $2-p = 5 \cdot 10^6$ Па, $3-p = 10 \cdot 10^6$ Па) и волнового пакета, запущенных с расстояния $h_1 = 500$ м от проницаемого участка. При этом проницаемый участок находится вблизи дна скважины. Осциллограммы 1, 2, 3 и 4 соответствуют показаниям датчиков D_1, D_2, D_3 и D_4 , расположенных: в точке запуска сигнала, вблизи границы раздела при $z = 0$, в начале проницаемого участка и на дне. Исходный сигнал представляет собой импульс давления колоколообразной формы единичной амплитуды. Временная протяженность исходного импульса равна $\Delta t = 10^{-3}$ с. Для представленного примера окружающая цилиндрический канал $a = 5 \cdot 10^{-2}$ м пористая среда $k^{(1)} = 10^{-13}$ м², $m^{(1)} = 0.2$ однородная; длина проницаемого участка равна $h_2 = 5$ м. Первый всплеск в осциллограмме датчика D_1 выражает исходный сигнал, запущенный с расстояния $h_1 = 500$ м от проницаемого 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 проницаемого участка. Далее часть сигнала возвращается к датчику D_1 (второй всплеск в осциллограмме датчика D_1), другая часть распространяется в участке скважины с проницаемыми стенками (первый всплеск в осциллограмме датчика D_3). В волноводе (обсаженной зоне) вязкость и теплопроводность слабо искажают акустический сигнал. По мере распространения в открытом участке, этот сигнал затухает из-за проявления фильтрационных эффектов. Сигнал, дошедший до жесткой стенки (первый всплеск в осциллограмме датчика D_4), после отражения распространяется в обратном направлении. Если амплитуда сигнала достаточно велика, то он доходит до границы проницаемого участка (второй всплеск в осциллограмме датчика D_3). Далее ситуация повторяется: часть сигнала отражается от границы раздела, а часть проходит через нее (третий всплеск в осциллограмме датчика D_2). Если после этого прошедший сигнал имеет достаточно заметную амплитуду, то он возвращается к источнику сигнала (третий всплеск в осциллограмме датчика D_1). Динамика отражения вторичных волн в необсаженной зоне продолжается до тех пор, пока акустические сигналы полностью не затухнут из-за фильтрации газа в окружающую пористую среду. Пунктирные линии соответствуют случаю, когда проницаемый участок отсутствует.

Третья глава посвящена исследованию эволюции гармонических волн и волновых пакетов в зазоре перфорированных скважин, окруженных проницаемой средой.

Для модели локального способа акустического контроля приняты следующие допущения:

- канал заполнен той же акустически сжимаемой средой (газом), что и несжимаемый

скелет окружающего его пористого пространства;

– длина зонда L значительно больше длины волны λ ($L \gg \lambda$), которая в свою очередь больше толщины зазора между корпусом зонда и скважины $\lambda \gg (a - a_1)$;

– кроме того, будем пренебрегать влиянием вязкости и теплопроводности на изменения импульса давления в этом зазоре (эволюция сигнала в основном определяется эффектами фильтрации в окружающее пористое пространство).

С учетом отмеченных допущений для описания распространения возмущений между поверхностями корпуса зонда и скважины, окруженной однородной пористой средой представлена следующая система линеаризованных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{2\pi b^2 n a \rho_0}{a^2 - a_1^2} u, \quad \rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z}, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\pi b^2 l \rho) &= \rho_0 \pi b^2 u - 2\pi l \rho_0 u^{(1)}, \\ \rho_0 \frac{\partial u^{(1)}}{\partial t} &= -m^{(1)} \frac{\partial p^{(1)}}{\partial r} - \frac{m^{(1)} \mu_g}{k^{(1)}} u^{(1)}, \quad m^{(1)} \frac{\partial p^{(1)}}{\partial t} + \frac{\rho_0}{r} \frac{\partial (r u^{(1)})}{\partial r} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь ρ - возмущение плотности газа, p - возмущение давления газа, w - скорость среды в зазоре между корпусом зонда и стенкой скважины, b - радиус канальцев, n - плотность перфорации, a - радиус, a_1 - радиус зонда, ρ_0 - плотность газа в невозмущенном состоянии, u - скорость фильтрации через радиальные трубчатые каналы, l - длина канальцев, μ_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 канальца выполняется условие:

$$u = u^{(1)}|_{r^{(1)}=b} \quad (10)$$

Когда канал окружен пористым пространством бесконечной толщины при распространении акустических возмущений в зазоре (фильтрационные процессы в пористой среде вблизи скважин происходят в слоях, характерная протяженность которых значительно меньше толщины пористого пространства вокруг скважины) систему уравнений (9) необходимо дополнить граничными условиями

$$p^{(1)} = p, \quad r^{(1)} = b; \quad (11)$$

$$p^{(1)} = 0, \quad r^{(1)} \rightarrow \infty; \quad (12)$$

На основании системы уравнений и граничных условий, для решения уравнения в виде гармонических волн, можно получить дисперсионное уравнение.

На рис.3 и 4 представлены расчетные осциллограммы, полученные методом быстрого преобразования Фурье с использованием дисперсионного соотношения, иллюстрирующие эволюцию волнового импульса (при различных длинах канальцев

перфорации: $1 - l = 0$ м, $2 - l = 0.2$ м, $3 - l = 0.4$ м) и волнового пакета с характерной временной протяженностью $\Delta t = 10^{-3}$ с в зазоре с радиусом зонда $a_1 = 3 \cdot 10^{-2}$ м. Осциллограмме D_1 соответствует исходный импульс ($z = 0$), осциллограммам D_2, D_3 и D_4 , -показания датчиков на расстоянии $z = 1, 2$ и 3 м. Для рассматриваемого примера принято, что внешняя граница зазора ($a = 5 \cdot 10^{-2}$ м) - пористая среда с параметрами: $k^{(1)} = 10^{-13}$ м², $m^{(1)} = 0.2$. Пунктирные линии соответствуют случаю, когда зонда в скважине нет или радиус его корпуса значительно меньше корпуса скважины ($a_1 \ll a$).

Можно отметить, что волновые пакеты глубже проникают в окружающую пористую среду, чем одиночный волновой импульс. Тем самым эволюция волновых пакетов в зазоре будет содержать более представительную информацию о состоянии пористых пластов.

В четвертой главе представлены результаты исследования эволюции гармонических волн и волновых пакетов в цилиндрической скважине, имеющей участок с перфорированными стенками и окруженный пористой проницаемой средой.

При составлении теоретической модели дистанционного способа акустического контроля приняты следующие допущения:

- скважина и несжимаемый скелет окружающего ее пористого пространства заполнены одним и тем же газом (в данной работе используется метан);

- вязкость и теплопроводность проявляются лишь в тонком пограничном слое вблизи твердой стенки скважины при распространении волновых возмущений;

- акустический сигнал распространяется вдоль оси скважины, а протяженность импульса λ в канале значительно больше длины проницаемого донного участка h_2 ($\lambda \gg h_2$). В силу этого допущения проницаемый участок можно принять за "отражающую поверхность" с координатой $z = 0$;

- сжатие и растяжение газа при распространении возмущений в скважине происходит в режиме, близком к адиабатическому.

Для распространения акустических волн в скважине и процесса фильтрации газа в окружающее пористое пространство при прохождении волны через участок канала с перфорированными стенками, представлены следующие уравнения:

$$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t}(\pi b^2 l \rho) = \rho_0 \pi b^2 u - 2 \pi b l \rho_0 u^{(1)}, \quad (13)$$

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

$$u = u^{(1)}|_{r^{(1)}=b}, \quad p^{(1)} = p(r^{(1)} = b), \quad p^{(1)} = 0(r^{(1)} \rightarrow \infty).$$

Здесь ρ - возмущение плотности газа, p - возмущение давления газа, w - скорость среды в зазоре между корпусом зонда и стенкой скважины, b - радиус канальцев, n - плотность

перфорации, a -радиус скважины, ρ_0 - плотность газа в невозмущенном состоянии, u - скорость фильтрации через радиальные трубчатые каналы, $u^{(1)}$ - скорость фильтрации через боковые стенки радиальных трубчатых каналов, l -длина каналов, μ_g - динамическая вязкость газа, $k^{(1)}$ -коэффициент проницаемости, ν^p - коэффициент пьезопроводности, $p^{(1)}$ - распределение давления и скорости фильтрации вокруг канала. При этом на цилиндрической границе канала выполняется условие (10).

Уравнение сохранения массы на "отражающей поверхности" в линеаризованном приближении

$$\frac{1}{C^2} \frac{\partial p}{\partial t} = \rho_0 \frac{w_- - w_+}{h_2} - \frac{2\pi b^2 n \rho_0}{a} u \quad (14)$$

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 каналов, 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 (проницаемый участок находится вблизи дна скважины, например), в (14) следует принять $w_+ = 0$.

Когда канал окружен пористым пространством бесконечной толщины (фильтрационные процессы при распространении возмущений происходят в слоях, толщина которых значительно меньше толщины пористого пространства вокруг канала) систему условий необходимо дополнить граничным условием (7).

На "отражающей поверхности" справедливы соотношения, вытекающие из условия непрерывности давления и неразрывности среды на границе (8).

На основании системы уравнений и граничных условий получены выражения для коэффициентов отражения и прохождения волны через проницаемый участок скважины, а также дисперсионное соотношение.

На рис.5 и 6 приведены расчетные осциллограммы, иллюстрирующие эволюцию волнового сигнала (при различных длинах каналов перфорации: 1 – $l = 0$ м, 2 – $l = 0.2$ м, 3 – $l = 0.4$ м) и волнового пакета, запущенного с расстояния $h_1 = 1000$ м от проницаемого участка. При этом проницаемый участок находится вблизи дна скважины. Осциллограммы 1 и 2 соответствуют показаниям датчиков D_1 и D_2 , расположенных: в точке запуска сигнала и вблизи перфорированного проницаемого участка $z = 0$. 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 $k^{(1)} = 10^{-13}$ м², $m^{(1)} = 0.2$, $h_2 = 3$ 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 перфорированный проницаемый участок скважины пористую среду, а часть возвращается к датчику D_1 (второй всплеск в осциллограмме датчика D_1).

В заключении сформулированы основные выводы и результаты работы:

1. Решена задача о распространении одиночного колоколообразного импульса и волнового пакета в скважине, имеющей проницаемый участок, когда длина волны значительно меньше протяженности проницаемого участка. Установлено:
 - по отраженным сигналам можно определить глубину залегания и протяженность проницаемого участка;
 - для любых частот коэффициент затухания в проницаемом участке скважины на два порядка выше, чем в обсаженном, поэтому влияние вязкости и теплопроводности газа на необсаженном участке мало по сравнению с фильтрационными эффектами;
 - в обсаженном участке скважины на диссипацию акустического сигнала вязкость газа влияет сильнее (примерно в 2 раза), чем его теплопроводность;
 - волновой пакет сильнее затухает в обсаженном участке скважины, чем одиночный импульс колоколообразной формы;
 - с увеличением коэффициента проницаемости растет доля акустического сигнала, прошедшего границу проницаемого участка;
 - акустический сигнал, запущенный при высоком давлении газа, несет больше информации о проницаемом участке, чем сигнал, запущенный в разряженной среде, т.к. меньше затухает в обсаженном участке скважины.
2. Решена задача об эволюции возмущения при распространении в зазоре между зондом и перфорированной стенкой скважины, которая сообщается с пористой проницаемой средой в случае, когда длина волны меньше длины зонда. Установлено:
 - при увеличении параметров перфорации (длина и диаметр каналов перфорации, а также плотность перфорации) фазовая скорость уменьшается, а коэффициент затухания растет, т.е. увеличивается доля акустического сигнала, которая

фильтруется в окружающее пористое пространство (наибольший вклад в диссипацию акустического сигнала, по сравнению с другими параметрами перфорации, вносит длина канальцев перфорации);

–с уменьшением толщины зазора снижается скорость и усиливается затухание акустических волн из-за фильтрации газа в окружающее перфорированный участок проницаемое пространство. Это позволяет подбором толщины зазора при ограниченной длине зонда, добиваться максимальной информативности эволюции сигналов в зазоре.

3. Решена задача об отражении акустического сигнала (одиночный импульс и волновой пакет) от перфорированного проницаемого участка, когда длина волны падающего сигнала больше протяженности перфорированного участка. Установлено:

–увеличение проницаемости перфорированного пористого пласта на порядок оказывает довольно существенное влияние на динамику отражения акустического сигнала: при высоких частотах "отражающая поверхность" ведет себя как свободная поверхность ($\omega \rightarrow \infty : N \rightarrow -1$), а при низких частотах – как жесткая стенка ($\omega \rightarrow 0 : N \rightarrow 1$);

–волновой пакет менее информативен по сравнению с колоколообразным импульсом, т.к. волновой пакет больше отражается от перфорированного участка, чем проходит;

–для дистанционного способа акустического зондирования, с целью определения параметров перфорации, выгодно использовать длинные волны, т.к. они меньше подвержены влиянию вязкости и теплопроводности в обсаженном участке скважины, чем короткие.

4. Приведенные результаты расчетов показывают, что отраженный от проницаемого донного участка перфорированной скважины акустический сигнал будет содержать информацию о коллекторских характеристиках этого участка. Отраженный сигнал от проницаемого участка канала расположенного у забоя скважины, отличается по форме (меняется не только амплитуда, но и фаза импульса) от отраженного сигнала при отсутствии проницаемости в забое. Волновые пакеты лучше использовать при локальном способе акустического зондирования, т.к. они несут больше информации о качестве перфорации. В случае дистанционного зондирования лучше использовать колоколообразные импульсы, т.к. волновые пакеты сильно затухают в обсаженном участке скважины.

Список публикаций:

1. Булатова З.А., Щеглов А.В. Акустическое зондирование скважин с проницаемыми участками // Труды Всероссийской научной конференции 16–18 сентября 2004г.–г.Стерлитамак.–Т.2.–С.35.
2. Булатова З.А., Щеглов А.В. Зондирование проницаемых участков скважин акустическими волнами // Сборник научных трудов Третьей Региональной научно–методической конференции "ЭВТ в обучении и моделировании" –Бирск: БГСПА, 2004. –Ч.1. –С. 117-121.
3. Булатова З.А., Щеглов А.В. Акустическое зондирование перфорированных газовых скважин // Материалы международной научно–технической конференции "Нефть и газ Западной Сибири" –Тюмень: "Феликс 2005. –Т.1. –С.103.
4. Булатова З.А., Щеглов А.В. Акустическое зондирование газовых скважин цугами волн // Тезисы докладов V Региональной школы–конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых–Уфа:РИО БашГУ,2005.–С.84.
5. Булатова З.А., Щеглов А.В. Зондирование газовых скважин цугами волн // Сборник трудов V конференции по физике и методике преподавания физики–Уфа:РИО БашГУ,2005.–С.112.
6. Булатова З.А., Щеглов А.В. К возможности дистанционного акустического зондирования перфорированных газовых скважин волновыми пакетами // Сборник научных трудов IV Региональной научно–методической конференции "ЭВТ в обучении и моделировании" –Бирск: БГСПА, 2005. –Ч.1. –С.260-266.
7. Булатова З.А., Щеглов А.В. Акустическое зондирование перфорированных газовых скважин длинными волнами //Обратные задачи в приложениях: Сб.науч. трудов./Отв. ред. С.М.Усманов // Всеросс. научно–практич. конф.22–23 мая 2006 г.–Бирск:Бирск.гос.соц.–пед.акад., 2006. –С.197.
8. Булатова З.А., Щеглов А.В. Зондирование перфорированных газовых скважин акустическими волнами // Материалы Всероссийской научно–практической конференции, посвященной 15-летию со дня принятия Декларации о государственном суверенитете Республики Башкортостан и 5-летию образования Нефтекамского филиала БашГУ, –Нефтекамск, 2006. –Ч.3. –С.110-113.
9. Булатова З.А., Щеглов А.В. К теории акустического зондирования газовых скважин // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей:Материалы 33-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского, 3 февраля 2006г.–Екатеринбург: УрО РАН, 2006.–С.436-437.

10. Шагапов В.Ш., Булатова З.А., Щеглов А.В. К возможности акустического зондирования газовых скважин // Инженерно-физический журнал № 3–Минск,2007.– С.21-26.
11. Шагапов В.Ш., Булатова З.А., Щеглов А.В. Динамика волн в каналах с перфорированными стенками // Бурение и нефть № 2–Москва,2007.–С.23-26.
12. Булатова З.А., Щеглов А.В. К теории акустического зондирования перфорированных газовых скважин // Нефтегазовое дело –Уфа,УГНТУ,2007.–[http://www.ogbus.ru/authors /Shagapov /Shagapov _ 1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Shagapov/Shagapov_1.pdf).

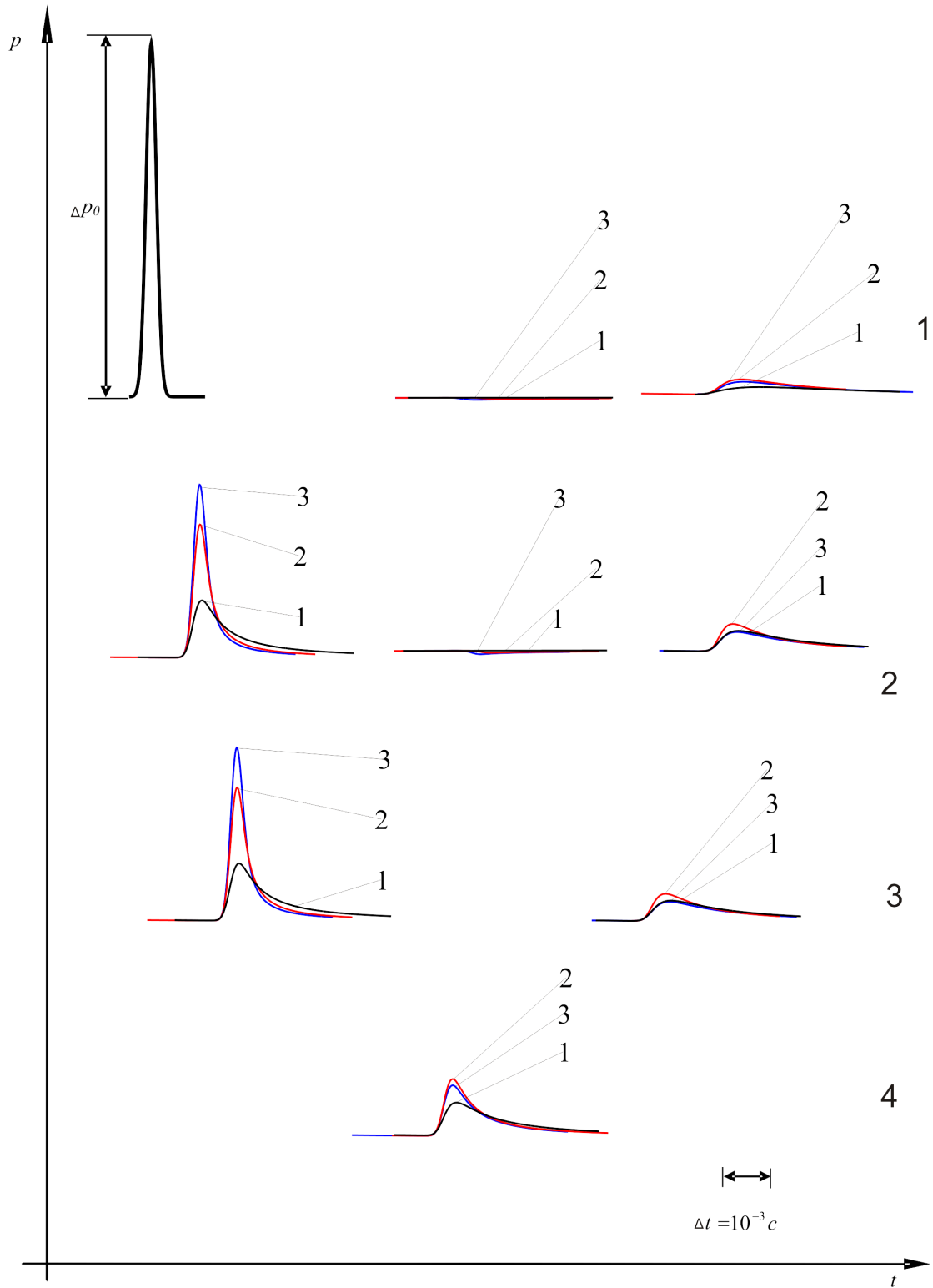


Рис. 1. Динамика отражения импульса давления ($T = 380 \text{ К}$, $\Delta t = 10^{-3} \text{ с}$) от донного участка скважины ($h_1 = 500 \text{ м}$, $h_2 = 5 \text{ м}$, $a = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$), окруженного пористой средой ($k^{(1)} = 10^{-13} \text{ м}^2$, $m^{(1)} = 0.2$) при различных давлениях газа: 1 – $p = 10^6 \text{ Па}$, 2 – $p = 5 \cdot 10^6 \text{ Па}$, 3 – $p = 10 \cdot 10^6 \text{ Па}$.

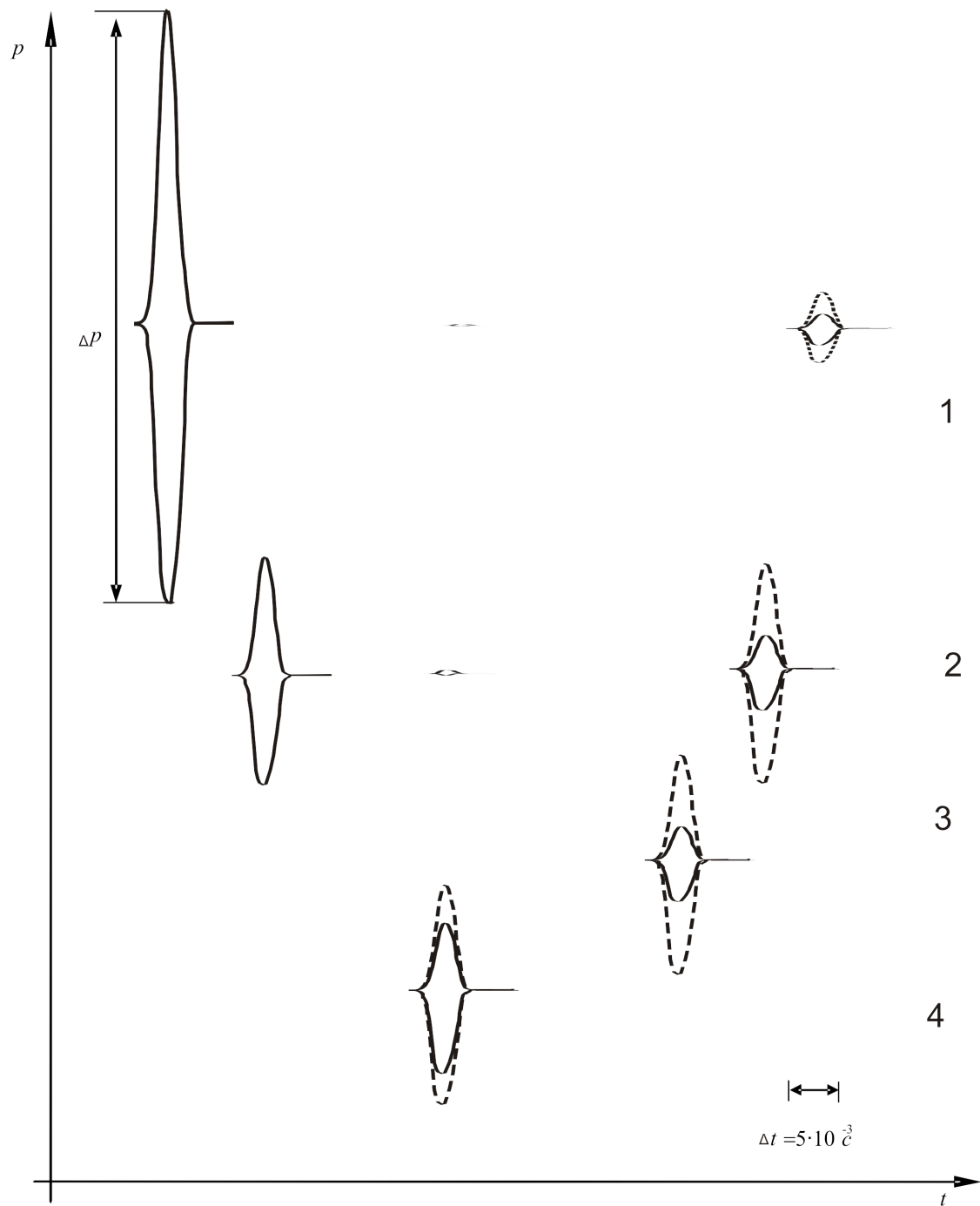


Рис. 2. Динамика отражения волнового пакета ($p = 10 \cdot 10^6$ Па, $T = 380$ К, $\Delta t = 10^{-3}$ с) от проницаемого участка ($k^{(1)} = 10^{-13}$ м², $m^{(1)} = 0.2$, $h_2 = 5$ м) скважины ($h_1 = 500$ м, $a = 5 \cdot 10^{-2}$ м). Пунктирные линии соответствуют случаю, когда проницаемый участок отсутствует.

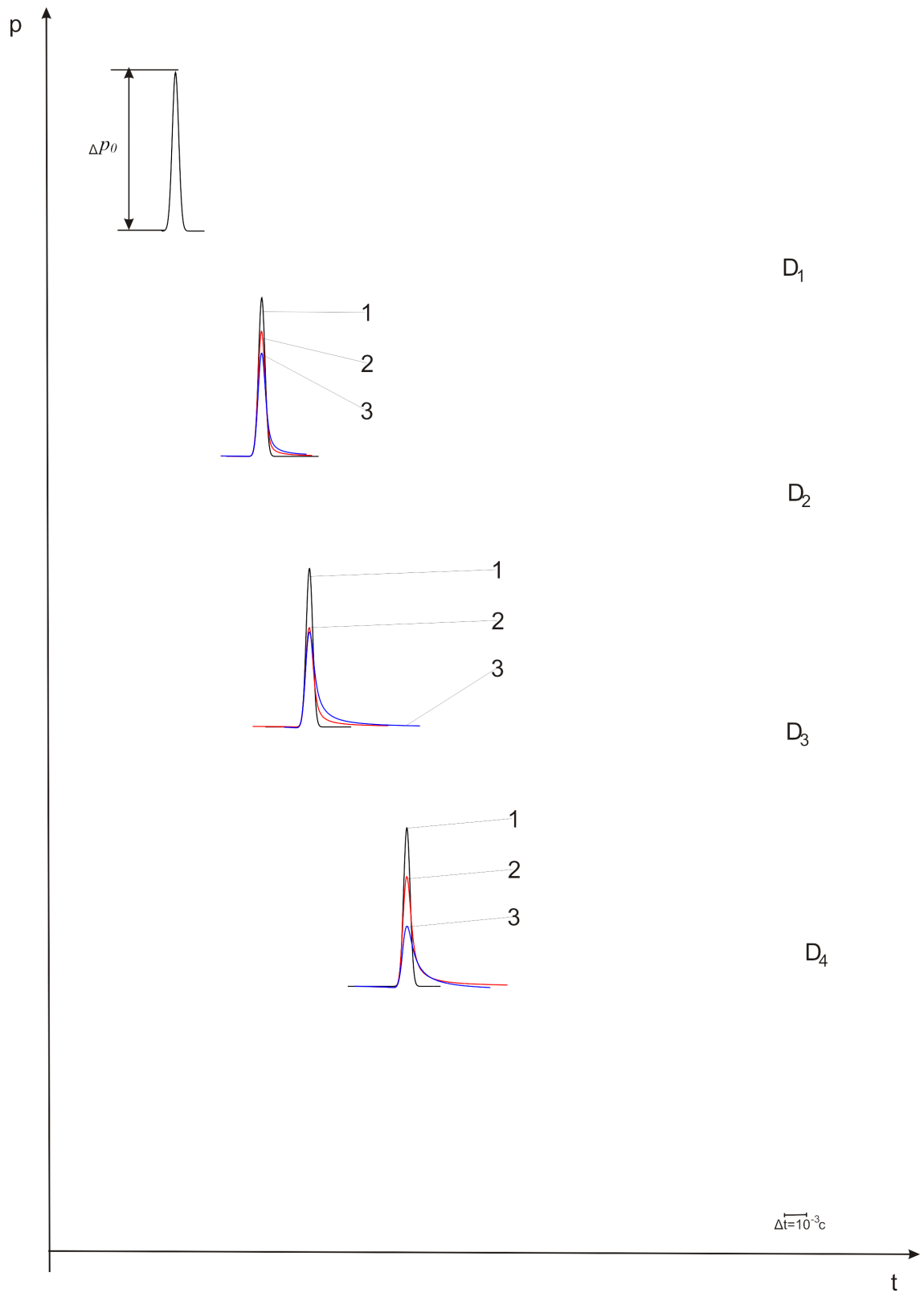


Рис. 3. Эволюция акустического сигнала ($p = 10 \cdot 10^6$ Па, $T = 380$ К, $\Delta t = 10^{-3}$ с) в зазоре перфорированной ($b = 0.005$ м, $n = 200$) скважины ($a = 5 \cdot 10^{-2}$ м, $a_1 = 3 \cdot 10^{-2}$ м) при различных длинах канальцев перфорации: 1 – $l = 0$ м, 2 – $l = 0.2$ м, 3 – $l = 0.4$ м. Датчик D_1 – расположен рядом с источником сигнала, а датчики D_2, D_3, D_4 расположены на расстоянии 1, 2, 3 метра от источника соответственно.

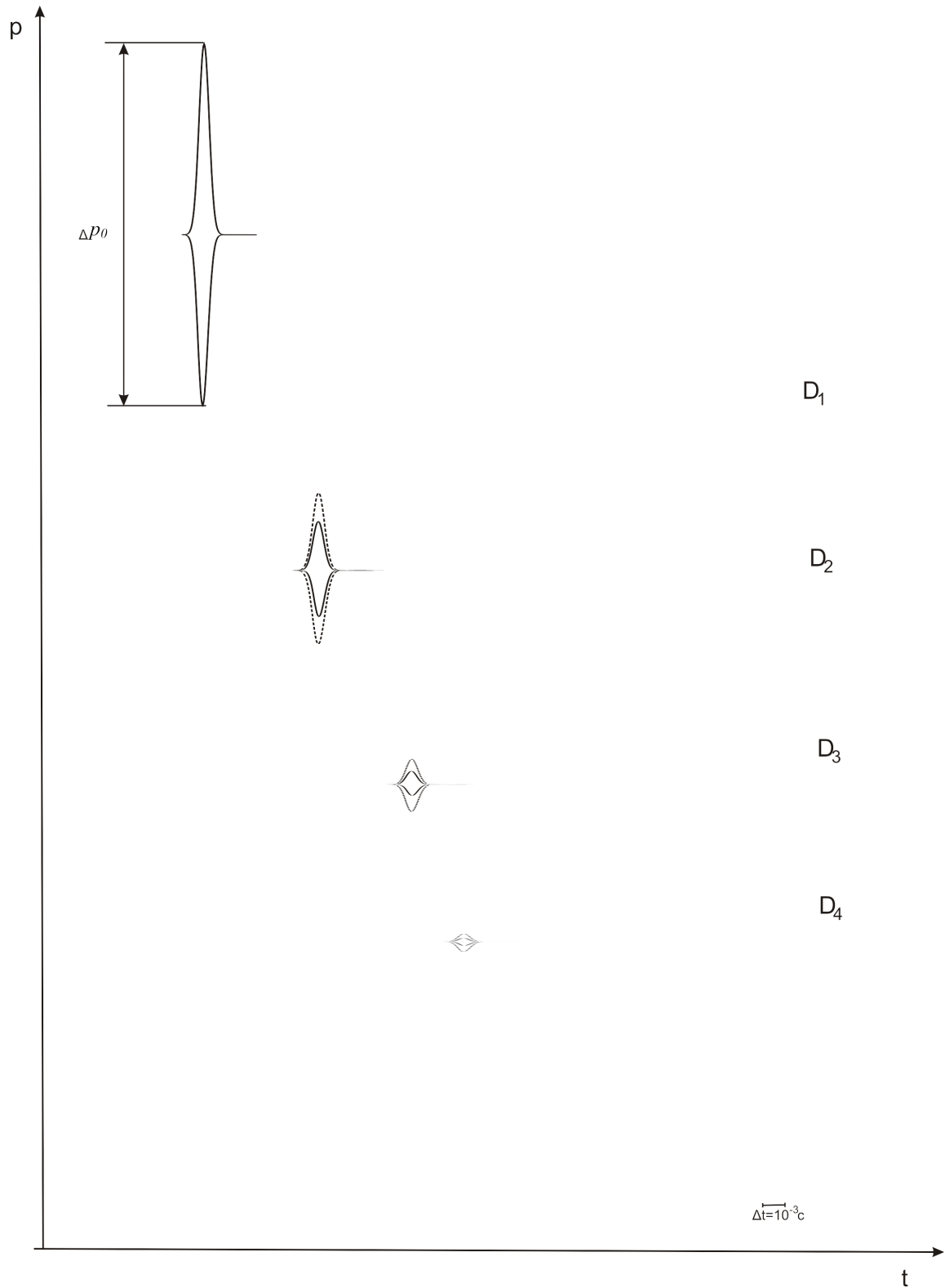


Рис. 4. Эволюция волнового пакета акустических волн ($p = 10 \cdot 10^6$ Па, $T = 380$ К, $\Delta t = 10^{-3}$ с) в зазоре перфорированной ($l = 0.4$ м, $b = 0.005$ м, $n = 200$) скважины ($a = 5 \cdot 10^{-2}$ м, $a_1 = 3 \cdot 10^{-2}$ м), окруженной однородным пористым пространством ($k^{(1)} = 10^{-13}$ м², $m = 0.2$). Пунктирные линии соответствуют случаю отсутствия зонда. Датчик D_1 —расположен рядом с источником сигнала, а датчики D_2 , D_3 , D_4 расположены на расстоянии 1, 2, 3 метра от источника соответственно.

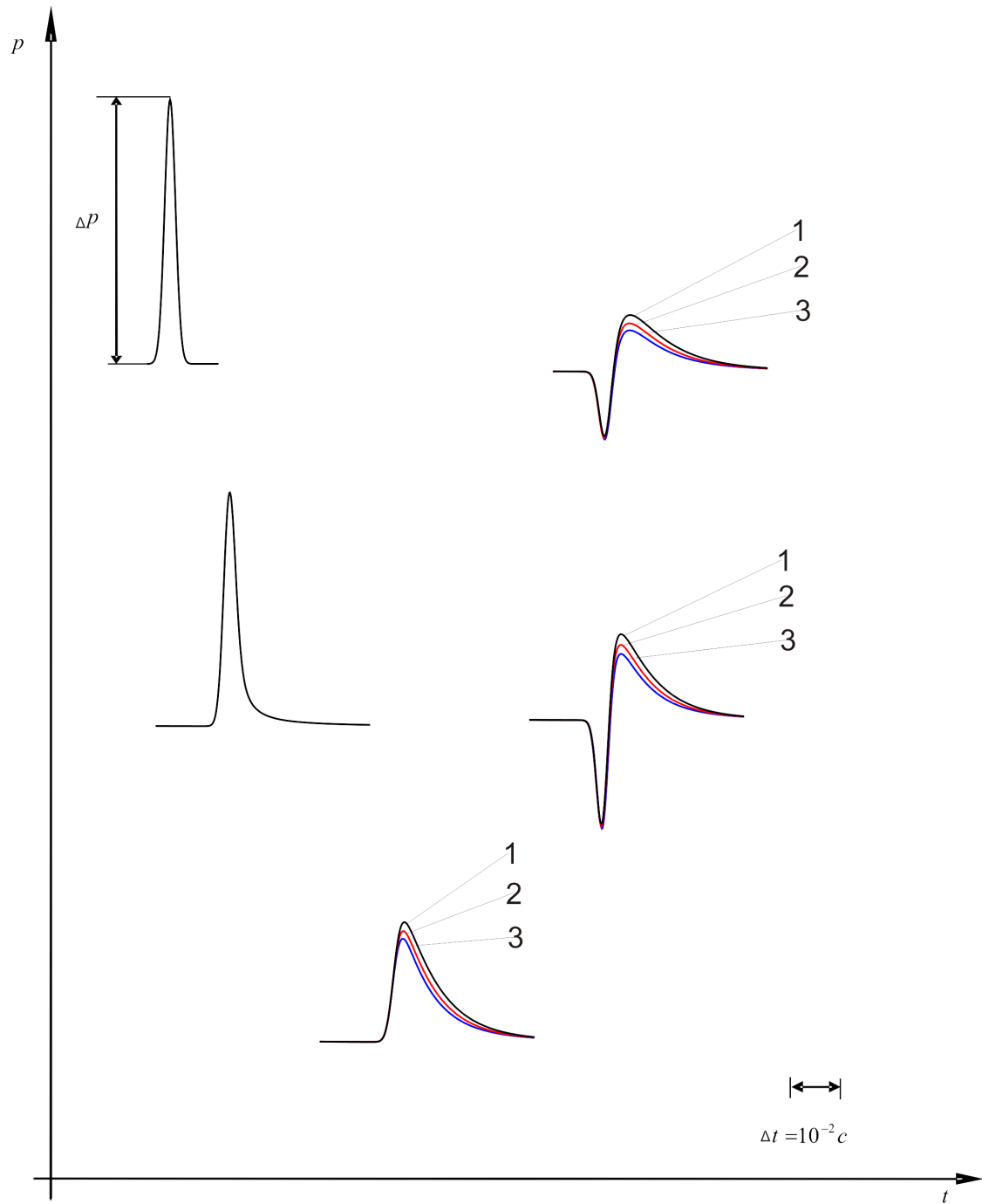


Рис. 5. Эволюционная картина акустического сигнала ($p = 10 \cdot 10^6$ Па, $T = 380$ К, $\Delta t = 10^{-2}$ с) в перфорированной ($b = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $n = 20$) скважине ($a = 5 \cdot 10^{-2}$ м, $h_1 = 1000$ м), окруженной пористой средой ($h_2 = 3$ м, $m^{(1)} = 0.2$, $k^{(1)} = 10^{-13}$ м²), при различной длине канальцев перфорации: 1 – $l = 0$ м, 2 – $l = 2 \cdot 10^{-2}$ м, 3 – $l = 4 \cdot 10^{-2}$ м

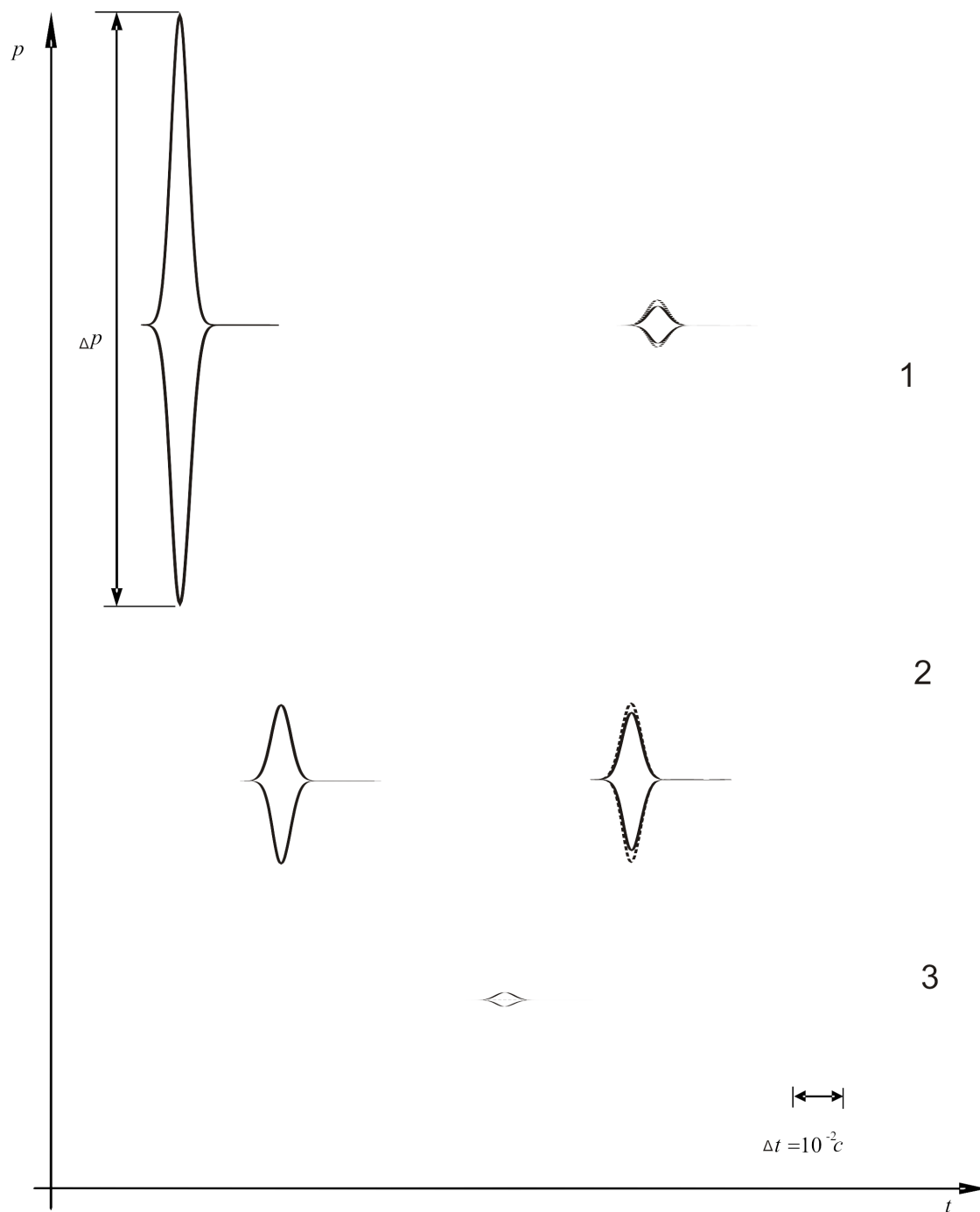


Рис. 6. Динамика отражения волнового пакета ($p = 10 \cdot 10^6$ Па, $T = 380$ К, $\Delta t = 10^{-2}$ с) от перфорированного ($l = 0.4$ м, $b = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $n = 20$) участка скважины ($a = 5 \cdot 10^{-2}$ м, $h_1 = 1000$ м), окруженной пористой средой ($h_2 = 3$ м, $m^{(1)} = 0.2$, $k^{(1)} = 10^{-13}$ м²), расположенного вблизи дна. Пунктирные линии соответствуют случаю, когда дна нет.