



Измерение пористости горных пород в методе акустического каротажа

Гик Л.Д., г. Новосибирск

Введение.

Трещины и поры горных пород играют определяющую роль в факторе содержания углеводородов нефтегазовых месторождений. К сожалению, измерение пористости и проницаемости пород-коллекторов прямым путем, при котором данный параметр непосредственно является выходной величиной эксперимента, для геофизических методов представляет собой трудную задачу. На практике находят широкое применение косвенные методы, в которых используется зависимость какого-либо физического параметра (обычно электрического сопротивления или скорости звука) от пористости. Измерение такого промежуточного параметра и последующая интерпретация пористости по данным его сравнения с некоторым «эталоном» и составляют косвенный метод измерения. Хотя такой путь находит повсеместное применение в производственной практике, он не уменьшает интереса к поиску прямых методов измерения, для которых выходной сигнал был бы прямо связан (желательно пропорциональной зависимостью) с параметром пористости, поскольку прямой путь измерения лишен ошибок, неизбежно сопровождающих любые косвенные методы измерений. В решении проблемы существенный прогресс, в связи с изобретением метода, основанного на мониторинге процесса проникновения бурового раствора в околоскважинное пространство [1,2]. Что же касается прямого пути измерения пористости, то его поиск для метода акустического каротажа является целью настоящей работы.

Механизм затухания сейсмических волн в пористых горных породах на принципе рассеивания-переизлучения сейсмических волн инерционными силами, возникающими при волновом движении «мягких» микронеоднородных включений (пор и трещин). Из двух возможных параметров горных пород сейсмической скорости и затухания в разведочной геофизике аномальные проявления в подавляющем большинстве случаев используются для параметра сейсмической скорости; параметр затухания находит применение значительно реже [3]. Однако в Институте геофизики СО РАН на основе использования средств ультразвукового сейсмического моделирования ранее была выполнена серия экспериментальных работ, которые показали, что декремент затухания обладает значительно более высокой чувствительностью к параметру пористости, чем сейсмическая скорость [4]. К сожалению, связать результаты проводимых экспериментов с выводами теоретических исследований в то время не удалось. Дело в том, что в классических работах по акустике центральное место занимают труды по изучению закономерностей распространения волн в газах (акустика помещений) и жидкостях (гидроакустика). В обобщающих трудах, например энциклопедической монографии [5], обзор достигнутых результатов, касающихся изучения закономерностей затухания звуковых волн, ограничивается объектами, представляющими собой жидкую вмещающую среду и микронеоднородные включения очень малых размеров.

В новейших геофизических исследованиях, выполненных Л.А. Молотковым, А.В. Бакулиным,

Дж. Хадсоном и др. [6-9], теоретический затухания проводился на основе использования значительных упрощений и приближений, существенно изменяющих реальную физику распространения звуковых волн в горных породах. Например, Хадсоном для того, чтобы решить задачу приближенное решение уравнения движения обтекающей жидкости, микронеоднородные включения рассматривались в виде эллипсоидов вращения, что по отношению к порам и трещинам нефтегазовых коллекторов является несомненно упрощением.

Закономерности рассеивания звуковых волн в горных породах, изучаемые теоретическими исследованиями, были нацелены, в первую очередь, на вторичные волны, переизлученные сравнительно крупномасштабными элементами [9], а не на исходный зондирующий сигнал, несущий основную информацию в методе акустического каротажа. Главный вывод в [9] сводился к факту очень малой величины уровня волн, обусловленных объектами, имеющими размеры, много меньшие длины волны зондирующего сигнала.

Важный для акустического каротажа вопрос закономерности затухания зондирующей волны

был предметом изучения в работах, выполнявшихся ранее нами средствами ультразвукового моделирования. Было установлено, что механизм вязкого трения, являющийся главным предметом изучения геофизиков (см., например [6-8]), хотя и присутствует при затухании сейсмических волн в высокопористых горных породах, но играет второстепенную роль. Вот некоторые факты, подтверждающие данное свойство. Замещение внутри трещин и пор маловязкой воды нефтью, обладающей большой величиной вязкости, слабо сказывается на затухании, а замещение любой жидкости газом, обладающим очень малой вязкостью, приводит не к уменьшению, а даже к увеличению затухания.

Анализ экспериментальных фактов привел нас к выводу о том, что главной причиной значительного затухания сейсмических волн в пористых и трещиноватых горных породах является эффект их рассеивания вследствие возникновения силового поля на «мягких» микронеоднородных включениях, хаотически расположенных внутри нефтегазового коллектора.

Чтобы показать это, рассмотрим волновое поле, возникающее при зондировании пористой геоакустической среды плоской гармонической звуковой волной, имеющей колебательную скорость $u' \sin(2\pi ft)$. Такой волне соответствует ускорение $u'' = 2\pi f u'$ и давление $p = u' \rho V_0$ см, например, [5]. Здесь V_0 и ρ_0 — сейсмическая скорость и плотность среды. Зависимость давления от колебательной скорости в акустике иногда именуется «акустическим законом Ома».

Некоторый i -й элемент рассматриваемой среды, имеющий объем V_i и соответствующую массу $m_i = \rho_i V_i$, в результате воздействия ускорения u'' действует на вмещающую среду силой $F_i = m_i \times u''$. Согласно условию хаотичного распределения в среде микронеоднородных включений, а значит и вторичных силовых источников, последние являются независимыми

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕЗЕНТАЦИИ: НОВЕЙШИЕ
РАЗРАБОТКИ РОССИЙСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ми. Каждый силовой источник излучает колебательное смещение $u_i = F_i / (4\pi\rho v^2 R)$, что физически означает отбор энергии от исходной зондирующей волны, а значит и возникновение затухания, величину декремента которого можно определить следующим образом.

Уменьшение амплитуды волны $d(u'(dl))$ на малом пространственном интервале dl может быть выражено как следствие перепада давления $d(p(dl))$ и на основании акустического закона Ома при величине волнового сопротивления ρV_0 оказывается равным

$$d(u'(dl)) = d(p(dl)) / (\rho_0 V_0) \quad (1)$$

Перепад давления $d(p(dl))$ является результатом действия суммы элементарных источников сил F_i на пространственном интервале dl :

$$d(p(dl)) = (1/S) \sum_{N(S,dl)} F_i = (1/S) [(2\pi fu') \times K_{пор}(Sdl)(\rho_0 - \rho_i)] \quad (2)$$

Здесь $N(S,dl)$ – количество элементарных силовых источников F_i в объеме пространства распространения волны (Sdl) , $K_{пор}$ – коэффициент пористости и $\rho_0 - \rho_i$ – разность между плотностью вмещающей горной породы ρ_0 и плотностью внутрипорового флюида ρ_i .

Далее, переходя от малого пространственного интервала dl к интервалу распространения волны конечной протяженности L , получаем:

$$u'(L) = u'(0) \times [1 + d(p(dl)) / (\rho_0 V_0)]^{(L/dl)}$$

Принимая во внимание, что для малых аргументов любой функции x справедливо соотношение $\exp(x) \sim 1 + x$ и, следовательно, $(1+x)^N \sim \exp(Nx)$, а также, учитывая выражение для длины волны $1/\lambda = f/u'$, получаем

$$u'(L) = \lim_{dl \rightarrow 0} (1 + dl)^{(L/dl)} = u'(0) \exp[2\pi f(K_{пор}(\rho_0 - \rho_i) / \rho_0)(L/\lambda)] \quad (3)$$

В акустике традиционным выражением эффекта затухания плоской волны является экспоненциальное соотношение, которое обычно представляется в виде:

$$u'(L)/u'(0) = \exp(-Q^{-1}L/\lambda) \quad (4),$$

где Q^{-1} – декремент затухания. Сопоставление (4) с (3) показывает их тождественность при значении декремента, равном

$$d(Q^{-1}) = 2\pi (K_{пор}(\rho_0 - \rho_i) / \rho_0) \quad (5)$$

Таким образом, декремент затухания пористых горных пород может быть выражен как произведение коэффициента пористости на относительную величину плотности внутрипорового флюида $(\rho_0 - \rho_i) / \rho_0$. Обратим внимание на тот факт, что ни размеры, ни тем более форма микронеоднородных включений не оказывают влияния на величину декремента.

Выражение (5) можно преобразовать таким образом, чтобы было удобным сравнение чувствительностей методов измерения коэффициента пористости, основанных на использовании влияния данного параметра как на затухание $d(Q^{-1}[K_{пор}]) / Q^{-1}[K_{пор}]$, так и на колебательную скорость $d(u'[K_{пор}]) / u'$. Действительно, разделив обе части равенства (5) на $Q^{-1}[K_{пор}]$, получаем:

$$d(Q^{-1}[K_{пор}]) / Q^{-1}[K_{пор}] = 2\pi [K_{пор}] \times Q[K_{пор}]$$

Здесь относительная величина плотности

внутрипорового флюида для простоты принята равной единице $(\rho_0 - \rho_i) / \rho_0 \sim 1$. Как видно, относительное изменение декремента в функции коэффициента пористости пропорционально добротности горных пород. Известно (см., например, [3]), что аналогичное соотношение для колебательной скорости имеет вид $d(u'[K_{пор}]) / u' = K_{пор}$. Таким образом, чувствительность по скорости оказывается меньше в Q раз. Поскольку горные породы в подавляющем своем большинстве являются высокодобротными средами, то данное обстоятельство означает существенное преимущество методов, использующих для измерения коэффициента пористости декремент затухания.

У реальных горных пород относительная величина плотности внутрипорового флюида изменяется в сравнительно узких пределах – от $\rho_i \sim 0$ (у газа) до $\rho_0 \sim 1$ г/см³ (у воды). Поэтому максимальное относительное изменение $(\rho_0 - \rho_i) / \rho_0$ составляет не более 30%. Это обстоятельство затрудняет диагностику вещественного состава внутрипорового флюида (определение либо газа, либо жидкости) по параметру затухания. Поэтому в данном вопросе электромагнитные методы имеют преимущество перед акустическими.

Мы выше не учитывали ту исходную величину затухания, которая имеет место в «сплошной» (лишенной пор) геоакустической среде, полагая, что $Q^{-1}[K_{пор} \rightarrow 0] \rightarrow 0$. В нефтегазовой геофизике такое допущение является близким к истине практически всегда, поскольку декремент затухания консолидированных горных пород обычно не превышает нескольких сотых: $Q^{-1}[K_{пор} \rightarrow 0] < 0,05$. К этому следует добавить, что имеется возможность ввести поправку на затухание волн в сплошной среде, используя статистическую взаимосвязь между декрементом и сейсмической скоростью сплошных горных пород. Данная зависимость может быть аппроксимирована (см. любой геофизический справочник) эмпирическим соотношением $Q^{-1}(K_{пор} = 0) \sim K_Q / v$, где v – скорость звука, а K_Q – эмпирический коэффициент. Поскольку величина сейсмической скорости v обычно бывает хорошо известна, то учет исходной величины декремента $Q^{-1}(V, K_{пор} = 0)$ может быть произведен, что и позволяет уточнить ту долевую часть декремента, которая вносится пористостью среды в суммарную его величину $Q^{-1}_{\Sigma} : Q^{-1}_{пор} = Q^{-1}_{\Sigma} - Q^{-1}(K_{пор} \rightarrow 0)$.

С целью изучения закономерностей, определяющих влияние пористости горных пород на затухание сейсмических волн нами ранее [4, 10] была проведена серия лабораторных экспериментов средствами физического (ультразвукового) моделирования. Для этого была изготовлена группа физических моделей, содержащих микронеоднородные включения (поры), заполненные либо газом, либо жидкостью (нефтью или водой). Эксперименты проводились как с двумерными (листовыми), так и трехмерными (объемными) моделями. Двумерные модели строились на основе тонкого листового алюминия. Такие модели являются эквивалентом двумерной (цилиндрической) вмещающей среды. Микронеоднородные газонаполненные включения имитировались просечками в теле листа.

Основной вид трехмерных (объемных) моделей изготавливался по принципу смеси пенопла-



ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕЗЕНТАЦИИ: НОВЕЙШИЕ РАЗРАБОТКИ РОССИЙСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ

стовых гранул и эпоксидной смолы. Такие модели соответствуют горным породам, содержащим газонаполненные поры. При размере пенопластовых гранул порядка 1-4 мм и длине волны зондирующего сигнала 5-50 мм достигается условие малости размеров микронеоднородных включений по отношению к длине волны зондирующего сигнала, которое имеет место в натуральных условиях.

Модели изготавливались в виде прямоугольных блоков, имевших размеры 250x250x28 мм³. Пенопластовые включения изготавливались в виде гранул, имевших размеры порядка 1x1x1,5 мм³. Были изготовлены четыре блока, в которых коэффициенты пористости были равными $K_{пор} = 0, 8; 16 \text{ и } 23 \%$. Эксперименты проводились на продольных волнах. Каждый блок помещался в водную среду, в которой осуществлялось его «просвечивание» ультразвуковой волной. Центральная частота зондирующего импульса выбиралась в пределах $f \sim 130-300 \text{ кГц}$. При этом длина волны в эпоксидной смоле составляла величину $\lambda = V/f = 5,7 - 13 \text{ мм}$. Полученные результаты измерения сведены в таблицу.

Эксперимент показал качественное соответствие величин декремента затухания, полученной в эксперименте, приведенным выше аналитическим выражениям.

$K_{пор}$	0	0,08	0,16	0,23
$Q^{-1}_{теор} = 2\pi \times K_{пор}$	0	0,5	1,0	1,45
$U_{воды} / U_{пор}$	1,03	2,18	4,75	3,9
$f_{вид} \cdot \lambda_{вид}$	140 гц 14,3 мм	187 гц 14,35 мм	140 гц 19 мм	140 гц 19,5 мм
$Q^{-1}_{эксп} = (\lambda_{вид} / L) \times \ln(U_{воды} / U_{пор})$	0,015	0,4	1,08	0,94

Изучение трещин и пор зондируемой среды стандартными зондами акустического каротажа. Типичная для производственной практики конструкция зонда акустического каротажа представляет собой источник звуковых (или ультразвуковых) волн и два приемника зондирующего сигнала. Внутри стального корпуса помещается магнитострикционный источник и на некотором удалении от него два геофона (пьезоэлектрических приемника звуковых сигналов). Расстояние между источником и ближним геофоном чаще всего выбирается в пределах $L_1 = 1-2 \text{ м}$. Расстояние между геофонами обычно составляет $L_2 = 0,4 \text{ м}$.

В производственных условиях акустические параметры зондируемой среды обычно определяются на пространственном интервале базы L_2 . Скорость звука, как правило, измеряется простейшим путем – как отношение базы L_2 к интервалу времени распространения волны $t_2 - t_1$: $V = L_2 / (t_2 - t_1)$. Декремент затухания – как результат уменьшения амплитуды волны, реже – как результат увеличения видимого периода. Используемая в зондах база наблюдения L_2 имеет сравнительно малую длину, что делается в целях повышения пространственного разрешения тонкослойной геоакустической среды, но точность измерения скорости распространения волны V и декремента затухания Q^{-1} при этом ограничивается.

Рассмотрим соотношения, определяющие

декремент затухания для стандартного акустического каротажа. Зондирующий создается силовым источником F , обычно магнитострикционным, режущим пьезоэлектрическим. Под его влиянием возникает звуковая колебательная скорость которой на основании закона Ома может быть выражена соотношением $u'(0) = F/Z_0$. Здесь Z_0 – волновой импеданс вблизи источника. Полагаем, что геоакустической средой, окружающей источник, является буровой раствор. Волна проникает за пределы корпуса зонда в горную породу, окружающую скважину. Значение Z_0 можно выразить соотношением:

$$u'(L=0) = u'(0) K_{прох}$$

Здесь $K_{прох}$ – коэффициент прохождения, который можно выразить соотношением:

$$K_{прох} \sim Z_0 / (Z_0 + Z_{гп}) \approx (1 - Z_0 / Z_{гп})$$

где $Z_{гп}$ – волновой импеданс зондируемой горной породы, который обычно существенно превышает акустический импеданс бурового раствора, т.е. $Z_0 \ll Z_{гп}$. Далее волна распространяется в зондируемой горной породе, испытывая при этом процесс расхождения $K_{расх}$ и затухания, т.е. поглощения и рассеивания K_0 . Процесс расхождения для источника малых размеров в однородной среде можно выразить соотношением $K_{расх} \sim L_s/L$, где L_s и L – размеры источника и интервала распространения волны. Обычно $L_s \ll L$.

Функцию затухания плоской волны в соответствии с (3)-(4) и разложением экспоненциальной функции в степенной ряд при условии $Q^{-1}L/\lambda \ll 1$ может быть записано:

$$K_Q = \exp(-Q^{-1}L/\lambda) \sim 1 - Q^{-1}L/\lambda$$

В итоге общее выражение для распространения акустической волны на пространственном интервале L может быть представлено в виде:

$$u'(L) = u'(0) \times K_{прох} \times K_{расх} \times \exp(-Q^{-1}L/\lambda) = (F/Z_0) \times (1 - Z_0/Z_{гп}) \times K_{расх} \times (1 - Q^{-1}L/\lambda) \quad (6)$$

Колебательная скорость на удалении L от источника $u'(L)$ фактически является выходным сигналом зонда. Выражение для декремента с учетом приведенных выше соображений, касающихся ослаблений амплитуды зондирующего сигнала при прохождении через корпус зонда, а также за счет расхождения, исходя из соотношений (4) и (6) может быть представлено в виде:

$$Q^{-1} = (\lambda/L) \times \ln((u'(0) \times K_{прох} \times K_{расх}) / u'(L)) \quad (7)$$

Использование приближения экспоненциальной функции затухания степенным рядом в выражении (6) приводит к линейной зависимости выражения декремента Q^{-1} :

$$Q^{-1} = (\lambda/L) [1 - (u'(L) / ((F/Z_0) \times (1 - Z_0/Z_{гп}) \times K_{расх}))] \quad (8)$$

Такая зависимость несколько упрощает его интерпретацию по материалам графического изображения картины волнового поля.

Из (7) и (8) видно, что отношение L/λ фактически представляет собой чувствительность зонда к параметру декремента затухания, поскольку $Q^{-1} / u'(L) \sim (L/\lambda)$. Из этого следует заключение о существовании оптимума в величине параметра чувствительности $Q^{-1}/u'(L)$.

Действительно, излишнее уменьшение L/λ во имя улучшения линейности измерения ведет к потере чувствительности. Поэтому в качестве компромисса между тенденцией повышения чувствительности и стремлением сохранения линейности измерения целесообразно строить зонд таким образом, чтобы соотношение между длиной волны зондирующего сигнала λ и его базой наблюдения L соответствовало условию $Q^{-1}L/\lambda \sim 1$ или иначе $L/\lambda \sim Q$. Этому условию соответствует частота зондирующего сигнала $f \sim VQ/L$. Увеличение частоты зондирующего сигнала выше указанного оптимума приводит к уменьшению величины выходного сигнала зонда $u'(L)$, что ухудшает его отношение по сравнению с аддитивным шумом $u'_{ш}$, всегда имеющим место на входе измерительной и регистрирующей аппаратуры зонда.

Представляет интерес сопоставление различных вариантов выборов базы зондирования L . Максимальной длине базы соответствует использование в качестве входной величины (параметра, оценивающего уровень зондирующей волны на начальной части траектории зондирования) – отношения возбуждающей силы F к волновому импедансу бурового раствора Z_0 в сочетании с приемом выходного сигнала дальним геофоном I_2 . Поскольку данному варианту соответствует максимальная величина отношения L/λ , то он оказывается привлекательным, когда частота зондирующего сигнала имеет величину существенно меньшую оптимальной величины $f \sim VQ/L$. Однако в данном варианте возбуждающая сила F и волновой импеданс Z_0 не измеряются в процессе зондирования, что заставляет использовать априорную информацию об их значениях. В данном варианте не осуществляется контроль коэффициентов прохождения сигнала через корпус зонда и коэффициента расхождения волны в зондируемой среде. Все это является причиной возникновения некоторых погрешностей.

Указанные обстоятельства не исключают применения данного варианта изучения коэффициента пористости в практике акустического каротажа. Действительно, погрешности в оценке величины $u'(0) = F/Z_0$ могут быть уменьшены усреднением данных измерения декремента по всему стволу скважины. Здесь очень существенно и то, что величина декремента для подавляющего большинства сплошных (лишенных пор) горных пород является малой величиной – менее $Q^{-1} \sim 0,05$, в то время как присутствие пор малой плотности в десятки раз увеличивает эту величину, что непосредственно следует из (4). Поэтому применение соотношения (6) для выделения нефтегазовых коллекторов средней и тем более значительной величины пористости ($K > 0,05$) по критерию скачка декремента затухания с использованием усредненных по длине ствола скважины параметров сигнала – это рациональный метод проведения акустического каротажа. Именно такой путь позволил нам реализовать измерение декремента и коэффициента пористости в некоторых практических условиях [10].

Другой вариант выбора базы зондирования – это использование в качестве входного значения волны сигнала в ближнем геофоне P_1 , а в качестве выходного значения – сигнала в дальнем геофоне P_2 . В этом варианте неопределенности в параметрах $u'(0) = F/Z_0$ и $K_{\text{проп}}$ исключаются, что уменьшает число вносимых погрешностей. Однако база зондирования по сравнению с рассмотренным выше вариантом ее максимальной

величины уменьшается в 4-5 раз, что во столько же раз уменьшает чувствительность зонда, увеличивая этим влияние аддитивных шумов зондирующего сигнала.

Некоторые нетрадиционные пути измерения декремента затухания. Трудности учета ослабления зондирующей волны при ее прохождении через корпус зонда и при расхождении в исследуемой среде являются причинами поиска таких методов измерения характеристик затухания, в которых указанные явления не оказывали влияния на конечный результат – величину декремента. Здесь, в первую очередь, привлекает внимание эффект изменения спектра зондирующего сигнала. Действительно, из (6) непосредственно видно, что спектр зондирующего сигнала линейно падает при возрастании частоты. Поскольку спектр сигнала не влияет ни на его прохождение через границу раздела сред, ни на «степень» расхождения волны, то путь измерения декремента, основанный на использовании спектрального разложения зондирующего сигнала, свободен от недостатков, свойственных методу, использующему соотношение (8). Однако, развитие такого метода – это не простая самостоятельная проблема. Дело в том, что спектральный анализ любой функции, имеющей жесткое ограничение временными рамками с двух сторон, является «тонким» процессом, требующим учета целого ряда факторов. Поэтому в данной работе мы ограничиваемся одним частным случаем – попытке измерения декремента на основе эффекта снижения «видимого» периода зондирующего сигнала, имеющего место при его распространении в геоакустической среде с затуханием. Поскольку на спектр сигнала практически не влияет его ослабление при прохождении через корпус зонда и при расхождении волны в исследуемой геоакустической среде, то представляется логичным попытку связать величину «видимого» периода с декрементом затухания. Анализ зависимости декремента от удлинения «видимого» периода $\Delta(T_B)$ на временном интервале распространения волны t_L приводит к соотношению [10]:

$$Q^{-1} \sim (\pi f_c / \Delta f)^2 (\Delta(T_B) / t_L) \quad (9)$$

Здесь Δf – ширина частотной полосы зондирующего сигнала, $f_c \cong 1/T_B$ – центральная частота спектра. Как видно из (9), декремент затухания является функцией приращения «видимого» периода. При этом относительная величина частотного спектра зондирующего сигнала $\Delta f / f_c$ играет роль чувствительности метода. К сожалению, функция измерения (9) является квадратичной, что является недостатком ее применения для практических измерений.

Коротко рассмотрим другой путь оценки характеристик затухания в методе акустического каротажа, основанный на использовании отношения амплитуд продольной и поперечной волн зондирующего сигнала U_p/U_s . Достоинством данного метода, предложенного В.З. Кокшаровым и др. [11], является технологичность в работе, поскольку в качестве выходных параметров данный метод требует измерения только амплитуд продольной U_p и поперечной U_s волн, выполняя интерпретацию зондируемого разреза по отношению U_p/U_s этих величин. К сожалению, авторы не приводят физического объяснения предложенного ими метода. Попытаемся восполнить этот пробел. Воспользуемся выражениями для амплитуд продольной и поперечной волн сигнала акустиче-



ского каротажа в виде:

$$U_p(L) = U_p(0) \times K_{\text{ПИС}} \times \exp(-Q_p^{-1}L/\lambda_p) \quad (10)$$

$$U_s(0) = U_p(0) \times K_{\text{ПС}};$$

$$U_s(L) = U_s(0) \times K_{\text{ПИС}} \times \exp(-Q_s^{-1}L/\lambda_s) \quad (11)$$

Здесь $U_p(0)$, $U_s(0)$, $U_p(L)$ и $U_s(L)$ – амплитуды продольной и поперечной волн на удалениях $L=0$ и L соответственно, Q_p^{-1} и Q_s^{-1} – декременты затухания продольной и поперечной волн, λ_p и λ_s – длины продольной и поперечной волн, $K_{\text{ПС}}$ – коэффициент обмена продольной волны в поперечную. На основании (10) и (11) получаем:

$$\begin{aligned} U_p(L)/U_s(L) &= K_{\text{ПС}} \times \\ &\exp(-Q_p^{-1}L/\lambda_p + Q_s^{-1}L/\lambda_s) \sim \\ &\sim (1/K_{\text{ПС}}) \times (-Q_p^{-1}L/\lambda_p + \\ &+ Q_s^{-1}L/\lambda_s). \end{aligned} \quad (12)$$

Воспользуемся свойством затухания сейсмических волн в высокопористых геоакустических средах, заключающимся в практическом равенстве декрементов затухания для этих волн. Данное утверждение объясняется тем, что излучение каждого элемента пористого пространства, являющегося причиной затухания, не зависит от направления движения волны. Поэтому допустимо принять $Q_p^{-1} \sim Q_s^{-1} \sim Q^{-1}$. Для подавляющего большинства горных пород, образующих нефтегазовые коллекторы, сейсмическая скорость поперечных волн вдвое ниже скорости продольных волн. Поэтому $\lambda_s \sim \lambda_p/2$. В результате выражение (12) может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} U_p(L)/U_s(L) &\sim 2Q^{-1} / \\ &/K_{\text{ПС}} L/\lambda_p \sim 4\pi K_{\text{ДОР}} \end{aligned}$$

Таким образом, отношение U_p/U_s представляет собой меру декремента затухания пористой среды, а значит и меру коэффициента пористости. Однако, для того, чтобы воспользоваться этим свойством необходимо обладать информацией о коэффициенте преобразования продольной волны в поперечную $K_{\text{ПС}}$, который в общем случае зависит от типа горных пород и характеристик скважины.

Выводы.

1. Аномально высокое затухание звуковых волн в высокопористых геоакустических средах (в том числе и в нефтегазовых коллекторах) объясняется в геофизических публикациях механизмами, основанными на трении внутрипорового флюида о стенки скелета. Такому механизму противоречат экспериментальные факты, например, увеличение затухания волн при замещении внутрипоровой жидкости газом. В настоящей работе сделана попытка объяснить причину затухания сейсмических волн в высокопористой среде механизмом, заключающимся в возникновении излучения полем сил, имеющих место при волновом движении «мягких» микро-неоднородных включений.

2. Количественный анализ данного эффекта приводит к соотношению: приращение декремента затухания выражается произведением коэффициента пористости на относительную величину плотности внутрипорового флюида. Для высокопористых нефтегазовых пород-коллекторов (имеющих коэффициент пористости

$K_{\text{ПО}} \sim 0,1-0,2$) величина декремента затухания оказывается в десятки раз выше, чем в результате действия иных механизмов.

3. Закономерностями рассмотренного явления является практическая инвариантность формы микро-неоднородных включений, независимость от частоты и уровня зондирующей волны. Затухание поперечных волн практически не отличается от затухания продольных волн.

4. Основным путем измерения декремента в методе акустического каротажа является измерение ослабления амплитуды зондирующего сигнала при его распространении на пространственных интервалах от силового возбудителя волны к акустическому приемнику. Оптимальным условием измерения соответствует такая частота зондирующего сигнала, при которой под влиянием затухания достигается уменьшение его амплитуды, близкое по абсолютной величине к измеряемой амплитуде.

Литература.

1. Кашеваров А.А., Ельцов И.Н., Эпштейн И.И. Гидродинамическая модель формирования зоны проникновения при бурении скважин. ПМТФ. 44, 6, 148-157.
2. Ельцов И.Н., Кашеваров А.А., Решетова Г.В., Черверда В.А. Проявление неоднородностей зоны проникновения в геофизических полях вдоль ствола скважины. // Геофизика. – 2004. №6. с. 17-21.
3. Козяр В.Ф., Белоконов Д.В., Козяр Н.В., Смирнов Н.А. Акустические исследования в нефтегазовых скважинах. // НТБ «Каротажник». Тверь: ГЕРС, 1999. Вып. 63. с. 12-17.
4. Гик Л.Д. Физическое моделирование распространения сейсмических волн в пористых и трещиноватых средах. // Геология и геофизика. – 1997. т.38. – №4-с. 804-815.
5. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука. 1973. 496 с.
6. Hudson J.A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks. // Geophysics, J. Roy. Astr. Soc., 1981, v. 64. p. 133-150.
7. Бакулин А.В., Молотков Л.А. Эффективные сейсмические модели трещиноватых и пористых сред. СПб., Изд-во С.-Петербургского ун-та. 1998, 141 с.
8. Чичина Т.И., Сабинин В.И., Ронкийо-Харийо Х., Оболенцева И.Р. Метод QVOF для поиска трещиноватых коллекторов. // Геофизика. – 2006. т. 47 – № 2. с.259-277.
9. Шапиро С.А., Файзуллин И.С. О затухании сейсмических волн в горных породах. Физика земли. № 9, 1986, с. 56-62.
10. Гик Л.Д. Определение коэффициента пористости в методе акустического каротажа. // Наука и технология углеводородов. 2002. №4. с.3-10.
11. Кокшаров В.З., Нефедкин Ю.А., Базелев Суздальникий Ф.М. Перспективы использования частотного акустического зондирования (ЧАЗ) для выделения газонасыщенных интервалов и изучения сложнопостроенных коллекторов месторождений. Сб. тезисов доклада «Геологическое строение, нефтегазоносность и перспективы освоения нефтяных и газовых месторождений Нижнего Приангарья». Сб. докладов Всерос. конф., Красноярск, 17-19 сентября 1996, с. 86.