



Измерение коэффициента пористости по данным декремента затухания

Гик Л.Д., г. Новосибирск

В работе [1] показано, что пористость, хаотически распределенная в пространстве геоакустической среды, приводит к значительному увеличению декремента затухания Q^{-1} сейсмических волн. Зависимость приращения декремента (по отношению к его значению в сплошной (лишенной пор) среде того же вещественного состава $Q^{-1}(K_n = 0)$) определяется соотношением:

$$d(Q^{-1}) = 2\pi K_n (\rho_0 - \rho_i) / \rho_0.$$

Здесь ρ_0 и ρ_i – плотность вмещающей среды и внутрипорового пространства, соответственно. В [1] также показано, что измерение декремента является рациональным путем измерения коэффициента пористости зондируемой среды. Тот факт, что приращение декремента, вызванное наличием пористости реальных нефтегазовых коллекторов, обычно превышает величину исходного декремента $Q^{-1}(K_n = 0)$ в десятки раз (см. [2-4]), делает возможным оценку величины коэффициента пористости по материалам наблюдения сейсмических волн не только в скважинах, но и на дневной поверхности. Подтверждение этого и является целью данной работы.

Вначале рассмотрим задачу, когда координаты расположения продуктивного пласта априорно известны. При этом, целью исследования является определение коэффициента пористости коллектора. Фактически, речь идет о показанном ранее в [3] эффекте «затенения» нижележащих геологических слоев продуктивным (пористым) слоем. В качестве изучаемого объекта мы будем рассматривать слоистую модель – типичную для осадочных структур, составляющих основу нефтегазовых месторождений. Примем, что продуктивный пласт представляет собой тонкий горизонтальный слой, имеющий мощность порядка $L \sim 5-10$ м. и обладающий аномально высоким (относительно вмещающей среды) поглощением $Q_{cl}^{-1} = 2\pi K_n \gg Q_0^{-1}$. Будем полагать, что как выше, так и ниже продуктивного слоя расположены пачки упругих слоев, обладающих сравнительно слабым поглощением $Q_0^{-1} \ll Q_{cl}^{-1}$.

Рассмотрим волну, отраженную от некоторого i -го горизонта, расположенного ниже поглощающего слоя, который будем условно считать «опорным». Амплитуду сейсмического сигнала u_i , отраженного от этого горизонта, представим в виде:

$$u_i = u_0 K_{отр,i} \times K_{зат}. \quad (1)$$

Здесь u_0 – амплитуда падающей волны, $K_{зат} = \exp(-Q_{cl}^{-1} \times 2L_{cl} / \lambda_{cl})$ – коэффициент затухания, $K_{отр,i}$ – коэффициент отражения от опорного горизонта и L_{cl} – мощность поглощающего слоя. В выражении (1) учитывается двукратное прохождение волны через поглощающий слой (в прямом и обратном направлениях). В качестве признака нефтегазоносности продуктивного слоя будем считать наличие повышенного затухания Q_{cl}^{-1} , следствием которого неизбежно становится падение амплитуды волны u_i , проходящей через этот слой. К сожалению, при простом визуальном наблюдении эффект аномально высокого ослабления волны, отраженной от опорного слоя, возникающего из-за затухания в продуктивном (поглощающем) слое, может быть обнаружен только в случае достаточно больших величин аргумента экспоненциальной функции – произведения декремента затухания на относительную величину мощности слоя $Q_{cl}^{-1} \times 2L_{cl} / \lambda_{cl}$.

Действительно, типичные параметры нефтегазовых коллекторов можно характеризовать такими цифрами. Декремент затухания (при коэффициенте пористости $K_n = 0,05-0,15$) составляет $Q_{cl}^{-1} = 2\pi K_n = 0,3-0,9$. Длину волны зондирующего сигнала обычно не удается уменьшить менее величины $\lambda_{cl} \sim v / f \sim 50-100$ м. Поэтому при мощности продуктивного слоя $L_{cl} \sim 5-10$ м. относительная величина пространственного интервала траектории волны оказывается равной $2L_{cl} / \lambda_{cl} \sim 0,01-0,4$. В результате, диапазон ослабления сигнала, обусловленный «затенением» действием пористого слоя, оказывается равным $\eta = d(u_i) / u_i = Q_{cl}^{-1} \times 2L_{cl} / \lambda_{cl} \sim 0,003-0,36$. Среднее значение «затенения» по порядку величины составляет $\eta \sim 0,18$. Это сравнительно небольшое уменьшение уровня амплитуды «опорной» волны, которое трудно визуальным образом заметить на изображении сейсмического разреза. Необходимо также учесть, что в условиях реального сейсмического зондирования имеют место существенные вариации как у коэффициента отражения $K_{отр,i}$, так и у амплитуды зондирующего сигнала u_0 .

По-видимому, именно по этой причине методы выявления пород – коллекторов, основанные на принципе ослабления сигналов проходящих сейсмических волн не получили широкого распространения в сейсморазведочной практике. Более того, известны ситуации, в которых амплитуды волн, отраженных от горизонтов, расположенных ниже продуктивного слоя, имели даже большую величину, чем амплитуды волн, отраженных от выше лежащих горизонтов. Такие факты могли истолковываться как опровержение возможности изучения месторождений на принципе интерпретации частичного «затенения» продуктивным слоем отражений от нижележащих горизонтов.

Обсудим некоторые возможные причины таких «опровергающих» фактов. Прежде всего, следует назвать литологические причины: нижележащие слои могут обладать большей акустической контрастностью, чем выше лежащие слои, что и может приводить к увеличению амплитуд отраженных от них волн, создавая иллюзию «усиления» волны пористым слоем. Могут также сказываться специфические особенности современных методов обработки сейсмической информации, а именно – автоматическое и программное регулирование уровня регистрируемых сигналов, которое практически повсеместно применяется для «выравнивания» амплитуд отраженных волн в целях облегчения визуального прослеживания зондируемых структур. Свойством «выравнивания отражений» обладает также и методика многократных перекрытий, получившая подавляющее распространение в современной сейсморазведке. Указанные факторы затрудняют визуальное наблюдение повышенного затенения поглощающим слоем опорных горизонтов, погруженных под этот слой.

Поэтому по нашему мнению требуется привлечение дополнительного признака, в качестве которого целесообразно использовать свойство частотной зависимости затухания волны при ее прохождении через высокопористый слой. Сущность такого пути заключается в следующем. Используется свойство независимости коэффициента отражения от частоты зондирующего сиг-

нала, имеющее место при больших величинах мощности отражающего объекта. В противоположность этому при прохождении через пористый слой сигнал затухает обратно пропорционально длине волны:

$$\eta = d(u_1)/u_1 = Q_{cl}^{-1} \times 2L_{cl} / \lambda_{cl},$$

что и может составить физическую основу для измерения декремента затухания, а по его величине и коэффициента пористости. Измерение затухания на разных длинах волн, или, по крайней мере, на двух длинах волн зондирующего сигнала λ_1 и λ_2 дает принципиальную возможность для осуществления измерений.

Приходится, однако, иметь в виду, что при малой величине мощности «опорного» горизонта (много меньшего длины волн зондирующего сигнала λ) имеет место частотная зависимость сигнала от опорного горизонта. Однако, отраженного от опорного горизонта. Однако, отраженного частотной зависимости ко в противоположность частотной зависимости являющегося данная частотная зависимость является положительной – амплитуда отраженного сигнала возрастает при увеличении частоты, благодаря чему сохраняется возможность выделения полезного эффекта – наличия аномально высокого поглощения в пористом слое.

Сопоставим приведенные результаты с экспериментами физического моделирования [5,6].

На рис. 1 приведены результаты физического моделирования эффекта «затенения» зондируемой среды пористым слоем. В качестве вмещающей среды была использована эпоксидная смола, упругие свойства которой близки к свойствам горных пород – коллекторов. Модели были изготовлены в виде прямоугольных блоков с размерами 170x170x28 мм. Микронеоднородные включения, имитирующие газонаполненные поры, представляли собой пенопластовые гранулы, размеры которых порядка 141,543 мм3 имели размеры много меньшие длины волны зондирующего сигнала. При «видимой» частоте $f=300$ кГц длина волны составляла $\lambda \sim 7-8$ мм. Распределение пор во вмещающей среде было хаотическое. Суммарное количество микронеоднородных включений подбиралось таким образом, чтобы 4 модельных блока соответствовали пористости горных пород соответственно 0, 8, 16 и 23 %. Зондирование проводилось в водной среде в целях обеспечения идентичности условий возбуждения и приема зондирующего сигнала. В дополнительном эксперименте зондирование было выполнено в

отсутствии пористых блоков. Эффект затухания показан на рис. 3 – кривая u_0/u_1 . Как видно, характерная для пород – коллекторов пористость в 8% и 16% приводит к существенному уменьшению сейсмического сигнала – соответственно в 1,9 и 4 раза. Обратим внимание на аномальный эффект – возникновение «просветления» при увеличении коэффициента пористости от 16% до 23 %. По-видимому, данный эффект возник из-за наличия упорядоченного расположения пор – нарушения

условия хаотичности, возникшего по причине технологических трудностей реализации хаотичности.

Обсудим возможность решения задачи получения информации об обнаружении в зондируемом объекте пористых (а, значит с большой степенью вероятности, и продуктивных) слоев на основании данных измерения декремента затухания сейсмических волн. В отличие от рассмотренного выше варианта, в данном случае будем иметь в виду объект, в котором априорная информация о существовании в зондируемой геоакустической среде продуктивного слоя отсутствует. По нашему мнению при таком условии в качестве критерия повышенного затухания вместо эффекта «затенения» нижележащих отражающих границ целесообразно использовать критерий снижения частотного спектра зондирующего сигнала, возникающего при пересечении волной пористого слоя.

При таком подходе предметом анализа становится только характеристика зондирующего сигнала – изменение его спектрально – временных параметров, имеющее место до и после пересечения зондирующей волной продуктивного слоя. При этом эффект затухания по причине малой величины декремента слабо сказывается на свойствах зондирующей волны на интервалах времени, предшествующих входу волны в продуктивный слой, и сохраняется в возросшем виде на всех временах, следующих после пересечения волной данного слоя. Таким образом, в момент вхождения волны в продуктивный слой происходит скачкообразное изменение его характеристик. Этот факт дает возможность для выявления малых изменений сигнала использовать его характеристики на значительных промежутках времени и таким образом реализовать статистические факторы накопления, чтобы затмить скачок декремента в качестве признака возросшего коэффициента пористости.

Рассмотрим количественные соотношения, характеризующие данный процесс. Зависимость амплитуды сигнала от его частоты

$$u(f) = u(f_0) \exp(-Q_{cl}^{-1} \times 2L_{cl} / \lambda_{cl}) \approx \approx u(f_0)(1 - 2Q_{cl}^{-1} L_{cl} v^{-1} f)$$

означает ослабление высокочастотных ком-

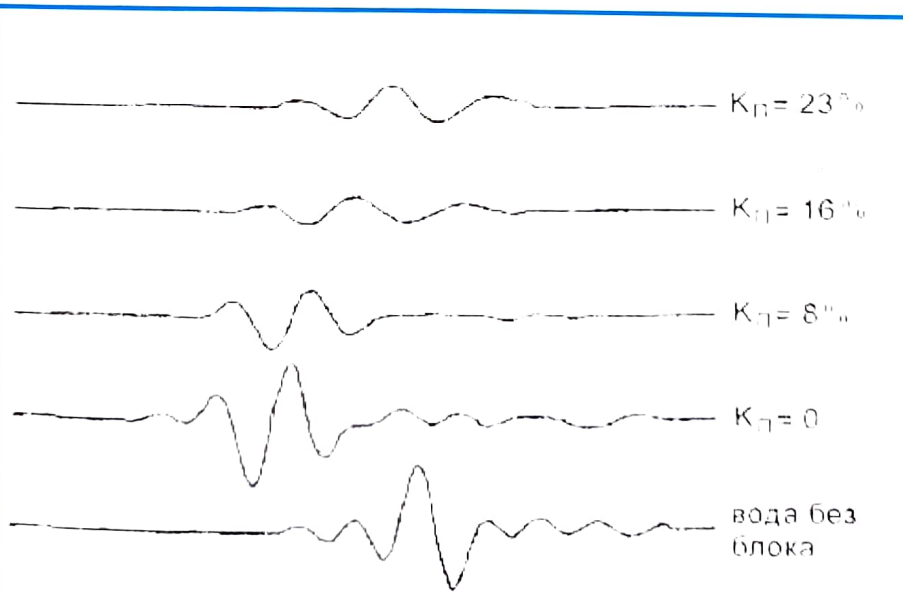


Рис. 1 Просвечивание блоков в водной среде.

понтент по сравнению с низкочастотными. Следствием этого становятся увеличение «видимых» периодов и удлинение интервалов времени нарастания зондирующих импульсов. Измерение и анализ этих величин фактически и составляет задачу выявления пористого слоя. Технически данную задачу можно решать как измерением величины снижения частотной полосы сигнала $d(f_{MAX})$, так и определением либо удлинения времени нарастания $d(\tau_{НАР})$ зондирующих сигналов, либо увеличения «видимого» периода.

Уменьшение частоты зондирующего сигнала f_{MAX} однозначно связано с увеличением времени нарастания его импульса $\tau_{НАР}$. Параметры f_{MAX} и $T_{ВИД}$ (а также $\tau_{НАР}$) с точностью до постоянного множителя являются взаимно обратными, что фактически следует из теоремы Котельникова. Действительно, при условии жесткого ограничения частотного спектра, когда спектральными компонентами выше частоты f_{MAX} можно пренебречь, соотношение между временем, в течение которого изменением функции зондирующего сигнала $u(t)$ можно пренебречь, и верхней граничной частотой спектра определяется выражением $\tau_{НАР} = 1/2f_{MAX}$. Параметры f_{MAX} и $\tau_{НАР}$ определяются декрементом затухания и слабо зависят от слоистости среды. Для синусоподобных импульсов, характерных для сейсмических процессов (имеются в виду формы вида импульсов Риккера, Берлаге или Пузырева), интервал времени нарастания импульса НАР однозначно связан с «видимым» («кажущимся») периодом $T_{ВИД} = 1/f_{ВИД} = 1/2\pi\omega T = 2\pi T$. Поэтому изучение, как вариации частотного спектра, так и изменения «видимых» периодов $T_{ВИД}$ (либо интервалов времен нарастания $\tau_{НАР}$) зондирующих сигналов является в равной степени информативным по отношению к определению параметра коэффициента пористости зондируемой среды. Однако, следует иметь в виду, что анализ изменения частотных изменений волнового поля требует проведения спектрального анализа, что

связано с соответствующими дополнительными расчетами. Поэтому попытка получения необходимой информации по анализу «видимых» периодов (или интервалов времени нарастания) импульсов является более заманчивой.

Количественно оценить взаимозависимость между частотно – временными параметрами сигнала и характеристиками затухания можно следующим образом. Зависимость спектральной компоненты верхней границы частотного диапазона зондирующего импульса аппроксимируем соотношением:

$$u(f)/u(f_0) \approx (1 - 2Q_{CL}^{-1}L_{CL}v^{-1}f).$$

Для учета влияния затухания аппроксимируем экспоненциальное соотношение степенным рядом:

$$u(f)/u(f_0) \approx (1 - 2Q_{CL}^{-1}L_{CL}v^{-1}f).$$

Числовой коэффициент $2Q_{CL}^{-1}L_{CL}v = \tau_{НАР}$ имеет физический смысл приращения времени нарастания зондирующего импульса, обусловленного затуханием сейсмического сигнала в пористой среде. При $Q_{CL}^{-1} \sim 0,6$, $L_{CL} \sim 10$ м, $v \sim 3000$ м/с имеет место $\tau_{НАР} \sim 4$ мс. При «видимой» частоте зондирующего сигнала $f_0 \sim 50$ Гц интервал нарастания гармонического сигнала составляет $\tau_0 \sim 1/6 f_0 \sim 3$ мс. Сравнение $\tau_{НАР}$ с τ_0 дает основание надеяться на то, что приращение интервала времени нарастания зондирующего сигнала окажется заметным.

Выше мы предполагали, что распределение пор в зондируемой среде имеет хаотический характер. Если же структура пористой среды является упорядоченной, то возникает анизотропия, которая обуславливает зависимость сигнала от направления зондирования [2]. Декремент затухания при этом уменьшается. Эксперименты физического моделирования показали, что затухание продольных волн сильнее зависит от направления зондирующей волны [4], чем затухание поперечных волн. Можно надеяться, что это свойство позволит получить некоторую информацию о структуре микронеод-

нородного пространства зондируемого коллектора. В условиях акустического каротажа это можно осуществить путем сопоставления декрементов затухания продольных и поперечных волн. При зондировании с дневной поверхности, учитывая технические трудности генерации поперечных волн, можно воспользоваться обменными волнами, оценивая эффект затухания только для восходящего направления волн.

На рис. 2 показаны волновые поля, соответствующие зондированию ранее упомянутых моделей пористых блоков продольными (P) и поперечными (S) волнами. Цель данного эксперимента – показать зависимость увеличения временных интервалов нарастания и «видимых»

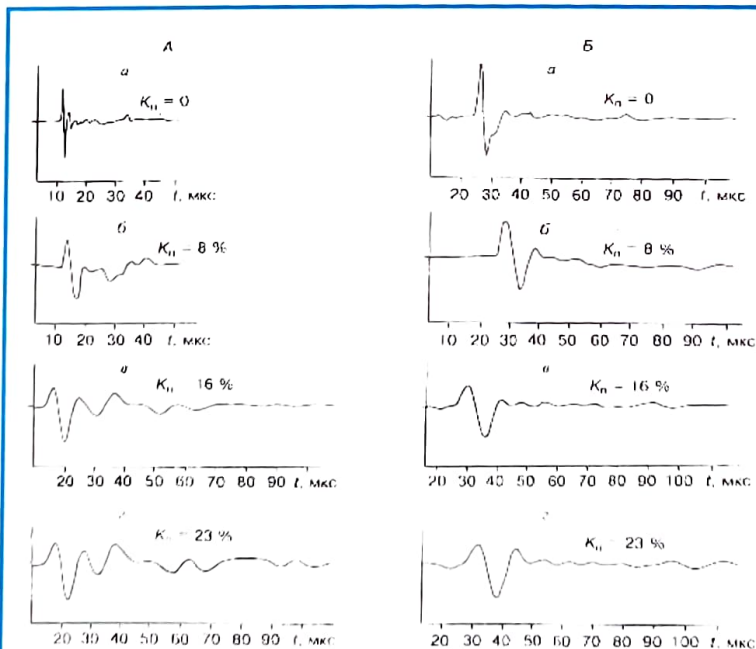


Рис. 2. Просвечивание блоков продольными (P) и поперечными (S) волнами.

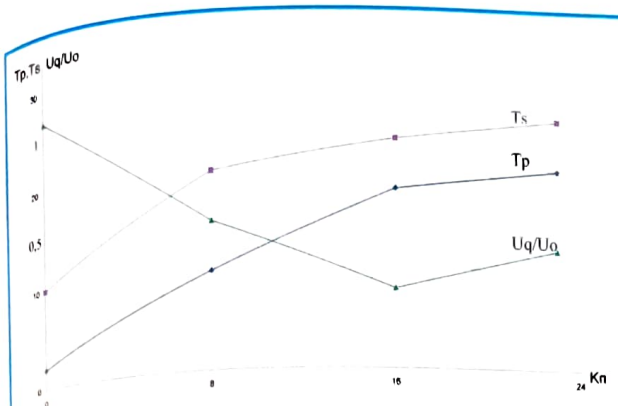


Рис. 3. Зависимость от коэффициента пористости (K_p) видимых периодов продольных (T_p) и поперечных (T_s) волн для волнового поля рис. 2 и отношения амплитуд прошедшей (u_q) и падающей (u_0) волн для волнового поля рис. 1.

периодов зондирующих сигналов при пересечении сейсмической волной пористого слоя.

На рис 3 приведены зависимости «видимых» периодов продольных (T_p) и поперечных (T_s) волн от коэффициента пористости зондируемой среды K_p . Эксперимент качественно подтверждает приведенные выше аналитические выводы. Вместе с тем, обратим внимание на тот существенный факт, что зависимость «видимых» периодов, как и зависимость «затенения», от коэффициента пористости K_p не является пропорциональной – приращение $d(T_p(K_p))$ уменьшается при увеличении K_p от 16 до 23 %. Однако, в отличие от эффекта «затенения», знак приращения «видимых» периодов не изменяется. Следует также обратить внимание на то, что величины приращения «видимых» периодов продольных и поперечных волн оказываются весьма близкими. Это можно рассматривать как факт, показывающий идентичность механизмов затухания продольных и поперечных волн в пористых геоакустических средах – рассеивание на микро-неоднородных включениях.

Отметим некоторые существенные достоинства «метода выявления пористых структур по критерию затухания» по сравнению со «структурным методом», основанным на выявлении анти-клинальных форм отражающих горизонтов. Во-первых, «метод затухания» дает надежду на получение прямой, а не косвенной информации о наличии углеводородов. Во-вторых, его применение избавляет от необходимости использования «тонких» методов определения строения верхней части разреза, необходимых для введения «статических поправок». В-третьих, данный метод не требует наличия протяженных профилей и может быть применен даже при точечных системах наблюдения. Поэтому его легче реализовать в труднопроходимых условиях, а также в условиях сложного рельефа местности, при которых традиционные профильные системы наблюдения, обеспечивающие возможность выполнения качественных структурных исследований, оказываются сложно реализуемыми.

Выводы.

1. При наземной системе наблюдения методом отраженных волн, информация об ослаблении волн при ее прохождении через зондируемый слой позволяет определить декремент затухания, а по его величине – коэффициент пористости изучаемого слоя. Для того, чтобы отличить малое проявление затухания от действия иных причин – влияния литологических факторов, изменения мощности опорного слоя и т.д., целесообразно в качестве признака наличия пористого слоя дополнительно использовать частотную зависимость декремента затухания.

2. Эффект затухания сейсмических волн в пористом слое может

быть применен напрямую и в разведочных целях. В этом случае в качестве критерия наличия пористого коллектора в зондируемой среде целесообразно использовать либо ограничение частотного спектра, либо удлинение времени нарастания зондирующего импульса, либо увеличение «видимого» периода зондирующего сигнала, возникающих из-за затухания сейсмических волн.

3. Достоинствами методов, использующих «эффект затухания», являются отсутствие необходимости в протяженных профилях наблюдения и выполнения детального изучения верхней части разреза с целью осуществления коррекции статик.

4. Справедливость приведенных в работе аналитических выкладок и сделанных на их основе рекомендаций подтверждена выполненными ранее экспериментами лабораторного физического моделирования.

Литература:

1. Гик Л.Д. Обработка (интерпретация) материалов акустического каротажа с целью прямого измерения пористости горных пород. Приборы и системы разведочной геофизики, №2, 2008 (в печати).
2. Сейсморазведка. Справочник геофизика. Ред. И.И. Гурвича и В.П. Номоконова. М., Недра, 1981, 464 с. (с.72-73).
3. Кондратьев О.К. Сейсмические волны в поглощающих средах. М.: Недра, 1986, 176 с.
4. Рапопорт М.Б., Рапопорт Л.И., Рыжков В.И. Эффект сейсмической неупругости залежей углеводородов и его использование при поисках, разведке и эксплуатации нефтегазовых месторождений, 8, 1997.
5. Гик Л.Д. Физическое моделирование распространения сейсмических волн в пористых и трещиноватых средах. //Геология и геофизика. – 1997 Т.38. –№4–с.804-815.
6. Гик Л.Д. Аномальные эффекты распространения сейсмических волн в пористых и трещиноватых средах. //Физическая мезомеханика. – 1998 Т.1. №2 – с. 101-106.