

О ПРЕОБЛАДАЮЩЕМ МЕХАНИЗМЕ ЗАТУХАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ТВЁРДЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

И. С. Файзуллин, Т. И. Файзуллин

АННОТАЦИЯ. На основании известных данных по моделированию, лабораторных измерений и теоретического рассмотрения показывается, что преобладающий механизм затухания упругих волн в твёрдых горных породах в сейсмоакустическом диапазоне частот связан с рассеянием на неоднородностях типа трещин и границ зёрен. Поэтому по измеренному затуханию проходящих волн можно оценивать на качественном уровне трещинную пустотность пород типа известняков и доломитов. Приводится приближённая формула для такого определения.

ABSTRACT. Based on known results of modeling and laboratory measurements and theoretical analysis it is demonstrated that a dominant mechanism of attenuation of elastic seismoacoustic waves in consolidated rocks is owed to scattering by heterogeneities presented by fractures and grain boundaries. Thus it is possible to qualitatively estimate the fractured porosity of limestone and dolomite from measured attenuation of transmitted waves. A related approximation formula is presented.

Несмотря на большое число работ, посвящённых рассмотрению вопросов поглощения и рассеяния упругих волн в горных породах, до сих пор не удаётся объяснить закономерности затухания, наблюдаемые в сейсмоакустике. Это в значительной степени снижает эффективность применения динамических характеристик сейсмических волн для изучения структурных особенностей строения геологической среды, разработки оптимальных методов воздействия на нефтяные пласты и т. д. Основная задача данного сообщения заключается в обосновании того факта, что потери энергии за счёт поглощения меньше потерь на рассеяние и что оцениваемое на практике затухание упругих волн определяется в основном потерями на рассеяние от тонких трещин и границ зёрен (блоков). Механизм поглощения при этом не рассматривается.

Известно, что затухание упругих волн в твёрдых горных породах происходит как за счёт поглощения, вызванного преобразованием упругой энергии в другие виды энергий, так и за счёт рассеяния на мелких по сравнению с длиной волны неоднородностях. Уже рассмотрено большое число механизмов поглощения, основные из которых приведены в [8]. В обстоятельной работе [8] рассмотрены теоретические модели, основанные на различных механизмах затухания, и проведено сравнение с опубликованными данными. Эти механизмы включают трение, течение жидкости, вязкую релаксацию и рассеяние. Делается вывод, что трение на тонких трещинах и границах зёрен является преобладающим механизмом потерь в консолидированных породах верхней части земной коры. Однако этот механизм приводит к зависимости затухания от амплитуды колебаний.

Кроме того, на его основе не удаётся объяснить различие в затухании, определяемом методом импульсного прозвучивания и методом резонансных колебаний. Так, логарифмический декремент затухания (в дальнейшем декремент затухания) при импульсном прозвучивании образцов известняка оказывается в 5 раз больше, чем при резонансных измерениях на образцах того же известняка [9]. В [6] сообщается о результатах измерений декремента затухания на образцах среднезернистого гранита методом импульсного прозвучивания на частотах 1 - 150 кГц и методом резонансных колебаний на частотах 1 - 50 кГц. В первом случае он оказывается почти в 5,5 раз больше.

Характерно, что во всех случаях при измерениях разными методами декремент затухания не зависит от частоты, поэтому отнести увеличение затухания за счёт рассеяния оказывается затруднительным, так как рассеяние на мелких неоднородностях (рэлеевское) не даёт наблюдаемой зависимости. Как следует из [7, 8], декремент затухания в этом случае пропорционален частоте в третьей степени. В [6] постоянство декремента объясняется рассеянием не на одиночных неоднородностях, а на их кластерах. Но при этом вводятся константы, выбором которых можно объяснить любую частотную зависимость.

Искомая частотная зависимость (постоянство декремента рассеяния) была получена в [4] методом физического моделирования на твёрдых трёхмерных моделях при случайном распределении неоднородностей в виде одинаковых трещин, меньших длины волны. Но поскольку моделирование проводилось в очень узком диапазоне частот, эти результаты не могут рассматриваться в качестве общих закономерностей. Однако та-

кая же частотная зависимость декремента рассеяния получена в теоретической работе [2], что снимает это ограничение. В [2] предлагается модель распространения упругих волн в среде со случайно распределёнными тонкими жёсткими включениями типа трещин, много меньшими длины волны. Для акустического случая (жёсткие включения в жидкости) получено выражение для декремента рассеяния δ_p в виде:

$$\delta_p = 2\pi V, \quad (1)$$

где V - объёмная концентрация включений.

Предложенная в [2] модель учитывает ослабление падающего поля, вызванное как непосредственными потерями на рассеяние, так и взаимодействием этого поля с рассеянным вперёд, что раньше не учитывалось. Взаимодействие этих полей осуществляется таким образом, что за счёт несинфазного сложения происходит ослабление проходящей волны, при этом дисперсия скоростей, как и в экспериментах на образцах горных пород, отсутствует [9]. Описываемое в [2] численное моделирование позволило раздельно рассчитать поля рассеянной вперёд и падающей волн и после их сложения получить поле проходящей волны. При этом поле рассеянной вперёд волны увеличивается по мере распространения, а поле проходящей - ослабевает. Если учесть, что отличие импульсного прозвучивания от резонансных измерений заключается в том, что в первом случае формируются устойчивые фронты рассеянной вперёд и проходящей волн, то можно предположить, что дополнительные потери в случае импульсного прозвучивания возникают за счёт механизма рассеяния, рассмотренного в [2]. Такое рассеяние, в отличие от рэлеевского, можно назвать нерэлеевским. А затухание, наблюдаемое при резонансных измерениях, по всей видимости, связано с поглощением, т. е. преобразованием упругой энергии в тепло за счёт других механизмов, также приводящих к постоянству декремента поглощения.

Таким образом, для пород, на которых были получены различные значения затухания при импульсном прозвучивании и резонансных колебаниях, можно считать, что потери на нерэлеевское рассеяние приблизительно в 5 раз превышают потери на поглощение. Если учесть, что на образцах горных пород количество открытых трещин незначительно, то нерэлеевское рассеяние происходило в основном на границах зёрен, поэтому декремент затухания, измеренный при импульсном прозвучивании, включает потери на поглощение и нерэлеевское рассеяние на границах зёрен.

Поскольку открытые трещины являются более контрастными неоднородностями, чем границы зёрен, то рассеяние на них должно быть значительно больше. Чтобы убедиться в этом, оценим декремент рассеяния на открытых трещинах, много меньших длины волны. Использовать для этих целей (1) непосредственно не представляется возможным, так как (1) получено для акустического случая, но можно считать правомочным применение вида полученной в [2] зависимости. Тогда по данным физического моделирования на твёрдых трёхмерных моделях [4] можно скорректировать посто-

янный множитель в (1). Из представленных в [4] моделей тонкими трещинами являются трещины с каучуковым наполнителем, для которых отношение длины к раскрытости равно 150. Декремент рассеяния продольных волн δ_{RP} на этой модели с учётом (1) принимает вид:

$$\delta_{RP} \approx 61V, \quad (2)$$

а для поперечных волн δ_{RS} -

$$\delta_{RS} \approx 87V. \quad (3)$$

Поскольку каучук по своим акустическим свойствам близок к жидкости, то (2) и (3) соответствуют трещиноватой среде, заполненной жидкостью.

Применение (2) и (3) для реальной объёмной концентрации (трещинной пустотности) $\sim 0,1\%$, измеренной в карбонатных коллекторах гидродинамическим методом [3], приводит к декременту рассеяния продольных волн, равному 0,06, а поперечных - 0,087. Как видно, это заметно превышает декремент затухания 0,017 на образцах известняка, измеренный методом импульсного прозвучивания для поперечных волн [9]. Таким образом, если известно, что нефтяной коллектор является трещиноватым, то по декременту затухания проходящих продольных или поперечных волн может быть определена на качественном уровне трещинная пустотность.

Обсуждение результатов

Потери энергии из-за трения и нерэлеевского рассеяния объясняются существованием в горных породах одних и тех же структурных элементов - тонких трещин и границ зёрен. Одинаковыми являются и частотные зависимости затухания (постоянство декремента), но нерэлеевское рассеяние устраняет слабые места теории трения, такие как зависимость затухания от амплитуды колебаний, обязательное наличие проскальзывания по трещинам и границам зёрен, невозможность объяснения зависимости затухания от способов его измерения. С учётом также того, что основные следствия, вытекающие из этих механизмов, одинаковы, выводы [8] могут быть отнесены к механизму нерэлеевского рассеяния, т. е. последний может рассматриваться в качестве преобладающего.

Декремент нерэлеевского рассеяния в несколько раз превышает декремент поглощения, и этим объясняется различие в затухании, измеренном разными методами. В сейсмоакустическом диапазоне частот меньшее значение затухания дают и другие механизмы, такие как струйное течение жидкости в порах и трещинах, рэлеевское рассеяние и т. д. [8]. Конкуренцию может составить только рассеяние на неоднородностях (трещинах), соизмеримых с длиной волны, но этот случай может быть обнаружен по наличию значительной аномальной дисперсии скоростей и частотной зависимости декремента затухания [1].

Следует отметить также, что однородное распределение неоднородностей по размерам представляется довольно редким явлением для горных пород. При рас-

пределении неоднородностей по размеру вида $n(a) = A/a^4$ (где A - постоянный множитель; a - размер неоднородностей) также может отмечаться отсутствие частотной зависимости декремента рассеяния при слабой дисперсии скоростей [5]. Однако, если учесть, что такое распределение носит частный характер и включает неоднородности, превышающие длину волны, то такие зависимости в любом случае могут наблюдаться в больших объёмах пород. В связи с этим для ограниченных объёмов и сейсмоакустического диапазона частот такое рассеяние не может рассматриваться в качестве преобладающего механизма затухания.

Выводы

- В твёрдых горных породах в сейсмоакустическом диапазоне частот преобладающим механизмом затухания является нерэлеевское рассеяние на неоднородностях, много меньших длины волны.
- В трещинных коллекторах нефти по затуханию проходящих продольных или поперечных волн может быть определена на качественном уровне трещинная пустотность.
- Значительное различие в декрементах затухания, измеренных методами импульсного прозвучивания и резонансных колебаний, может быть объяснено появлением нерэлеевского рассеяния при импульсном прозвучивании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ан П. В., Ивакин Б. Н., Файзуллин И. С., Цыплаков В. И., 1976, Влияние трещиноватости на скорость и поглощение упругих волн по данным моделирования: Сейсмоакустические методы изучения околоскважинного и межскважинного пространства: М., ОНТИ ВНИИЯГГ, 27 - 34.
2. Баев А. В., Куценко Н. В., Файзуллин И. С., 2007, О затухании и рассеянии сейсмических волн в трещиноватых средах: Геофизика, 2, 16 - 20.
3. Губайдуллин Ф. А., Ибатуллин Р. Р., Кандаурова Г. Ф., Хусаинов В. М., Фирсов С. Ф., 2003, Влияние техногенных факторов и физико-химические методы воздействия на коллекторские свойства карбонатных коллекторов: Труды 12-го Европейского симпозиума "Повышение нефтеотдачи пластов", Казань 8 - 10 сентября 2003 г., 218 - 223.
4. Файзуллин И. С., 1981, Затухание упругих волн в горных породах: Нефтегазовая геология и геофизика, 2, 29 - 31.
5. Файзуллин И. С., Шапиро С. А., 1987, О затухании упругих волн в горных породах, связанном с рассеянием на дискретных неоднородностях: ДАН СССР, 295, 2, 341 - 344.
6. Dane P. Blais, 1990, A direct comparison between vibrational resonance and pulse transmission data for assessment of seismic attenuation in rock: Geophysics, 55, 1, 51 - 60.
7. Hudson J. A., 1981, Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks: Geophys. J. R. Astr. Soc., 64, 133 - 150.
8. Johnson O. H., Toksoz M. N., Timur A., 1979, Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: Mechanisms: Geophysics, 44, 691 - 711.
9. Peselnick L., Outerbridge W. F., 1961, Internal friction in shear and shear modulus of solenhofen limestone over a frequency range of 10^7 cycles per second: J geophysical Res, 66, 581 - 588.

ОБ АВТОРАХ



**Ирик Султанович
ФАЙЗУЛЛИН**

Заведующий лабораторией разработок сейсмоакустических технологий ВНИИгеосистем, научный руководитель ООО НВП "Геоакустик", доктор физ.-мат. наук, профессор. Окончил Московский государственный университет в 1959 г. Разработчик технологий межскважинного прозвучивания, сейсмоакустического воздействия на пласт с целью повышения нефтеотдачи, сейсмической локализации бокового обзора. Автор более 100 печатных работ, имеет 9 патентов на изобретения.



**Тимур Иркинович
ФАЙЗУЛЛИН**

Научный сотрудник ООО "НВП Геоакустик". В 1990 г. окончил МИНХи ГП им. И. М. Губкина. Сфера профессиональных интересов - сейсмическая разведка по методике СЛБО.

Рецензент - кандидат технических наук В. П. Голосов.