



ПАО «Газпром»

Российский государственный университет
нефти и газа имени И. М. Губкина
(Национальный исследовательский
университет)



Презентационные материалы онлайн-курса «Основные технологические процессы Upstream-сектора нефтегазового комплекса»

**Акустические методы по
скорости и затуханию. Обработка
и интерпретация результатов
исследований. Решаемые задачи
и область применения**

- В зависимости от частоты излучаемого импульса различают высокочастотный (ультразвуковой) и низкочастотный (волновой, широкополосный) акустические методы.
- По типу регистрируемых параметров рассматривают акустические методы по скорости и затуханию, основанные на изучении кинематических и динамических характеристик упругих волн.

Упругость – свойство веществ сопротивляться изменению объема и формы под воздействием внешних механических напряжений, что обусловлено возрастанием внутренней энергии вещества.

Деформации, возникающие в веществе под действием внешней силы, называют **упругими** (или **обратимыми**), если после снятия напряжения вещество восстанавливает свои форму и объем. При превышении предела упругости в твердых телах после снятия напряжения остаются остаточные, или **необратимые** деформации. Различают деформации объема (растяжения, сжатия) и формы (сдвига).

Упругие свойства горных пород

Модуль Юнга (модуль продольной упругости) E	Коэффициент пропорциональности между действующим нормальным напряжением σ (сжимающим или растягивающим) и соответствующей ему относительной продольной упругой деформацией $\varepsilon = \Delta L/L$ $\sigma = E \cdot \varepsilon$
Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечного сжатия) ν	Коэффициент пропорциональности только между деформациями – относительными продольными $\Delta L/L$ и относительными поперечными $\Delta d/d$ $\Delta d/d = \nu \cdot \Delta L/L$
Модуль сдвига μ, G	Коэффициент пропорциональности между касательным напряжением τ и соответствующей деформацией сдвига γ $\tau = \mu \cdot \gamma$ характеризует способность тел сопротивляться изменению формы
Модуль всестороннего сжатия K	Коэффициент пропорциональности между давлением и относительным изменением объема в случае равномерного трехосного сжатия

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \mu$$

$$\nu = \frac{E}{2\mu - 1}$$

$$\mu = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2\nu)} = \frac{2\mu \cdot (1 + \nu)}{3 \cdot (1 - \nu)}$$

E – модуль Юнга.

ν – коэффициент Пуассона.

μ – модуль сдвига.

K – модуль всестороннего сжатия

Среднее значение упругих параметров для породообразующих минералов

Минералы	$\delta \cdot 10^3$, кг/м ³	$E \cdot 10^{10}$, Па	ν
Доломит	2.87	8.0	0.38
Кальцит	2.71	8.3	0.30
Кварц	2.65	9.6	0.08
Каолинит	2.60	0.5	0.45
Хлорит	2.87	6.5	0.22

По траектории движения частиц относительно фронта волны делятся на

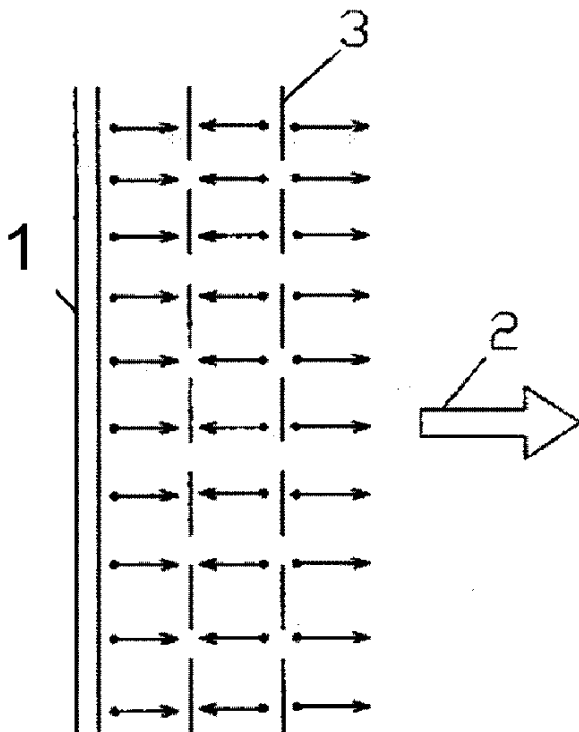
—продольные P,

—поперечные S,

—прямые гидроволны P_0 ,

—поверхностные трубные волны типа Стоунли, Лэмба, Рэлея.

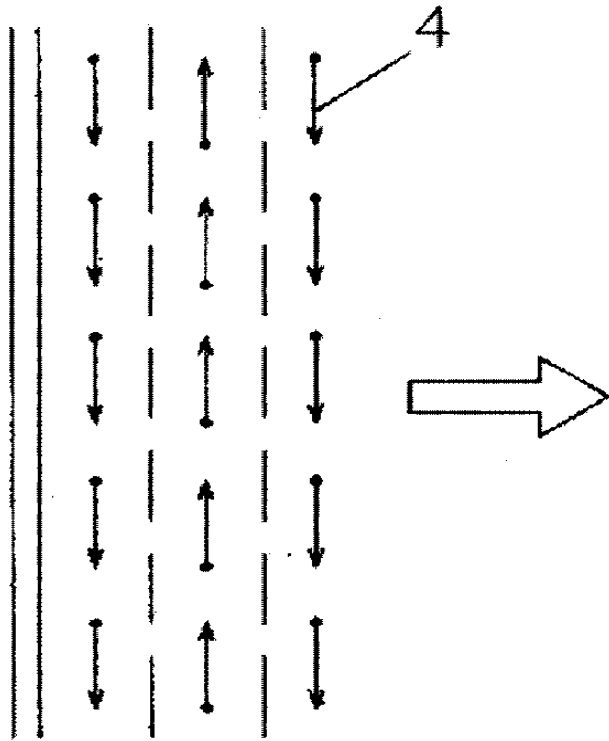
Продольные волны Р



Продольные волны связаны с деформацией объема среды. Распространение продольной волны представляет собой перемещение зон растяжения и сжатия. При этом частицы совершают колебания в направлении, совпадающем с направлением распространения волны

- 1 – излучатель,
- 2 – направление распространения волн,
- 3 – фронт волны

Поперечные волны S



Поперечные волны связаны с деформацией формы среды. Распространение поперечной волны представляет перемещение зоны смещений слоев друг относительно друга. Частицы среды совершают колебания в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны

- 1 – излучатель,
- 2 – направление распространения волн,
- 3 – фронт волны,
- 4 – траектория части

Связи скоростей распространения упругих волн с упругими константами среды

— скорость продольных волн

$$V_p = \sqrt{\frac{T(1-\nu)}{\delta_{II}(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

— скорость поперечных волн

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\delta_{II}(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\delta_{II}}}$$

Связи скоростей распространения упругих волн с упругими константами среды

– модуль Юнга

$$E = \frac{\delta_{\Pi} V_s^2 (3V_s^2 - 4V_p^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

– коэффициент Пуассона

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

– модуль сдвига

$$G = \delta_{\Pi} V_s^2$$

– модуль объемного сжатия (расширения)

$$K = \frac{1}{\beta} = \delta_{\Pi} \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$$

Коэффициент поглощения (затухания)

В общем случае продольные волны поглощаются более интенсивно, чем поперечные. Поглощение продольных волн связано с тепловыми и вязко-инерционными процессами, а поглощение поперечных – только с вязко-инерционными.

Коэффициент поглощения измеряется в дБ/м (или м⁻¹) и характеризует интенсивность поглощения энергии волн в среде, где находится зонд акустического метода.

$$\alpha = \frac{1}{\Delta L} \ln \frac{A_1}{A_2}$$

Коэффициент поглощения (затухания)

Коэффициенты затухания продольных волн увеличиваются в направлении от водонасыщенных пород (вп) к нефте- (нп) и газонасыщенным (гп).

$$\alpha_{P_{ВП}} < \alpha_{P_{НП}} < \alpha_{P_{ГП}},$$

а для поперечных волн, наоборот,

$$\alpha_{S_{ВП}} < \alpha_{S_{НП}} < \alpha_{S_{ГП}}.$$

Увеличение глинистости и трещиноватости горных пород способствует возрастанию коэффициентов поглощения продольных и поперечных волн. При этом поперечные волны более чувствительны к неоднородности среды, чем продольные.

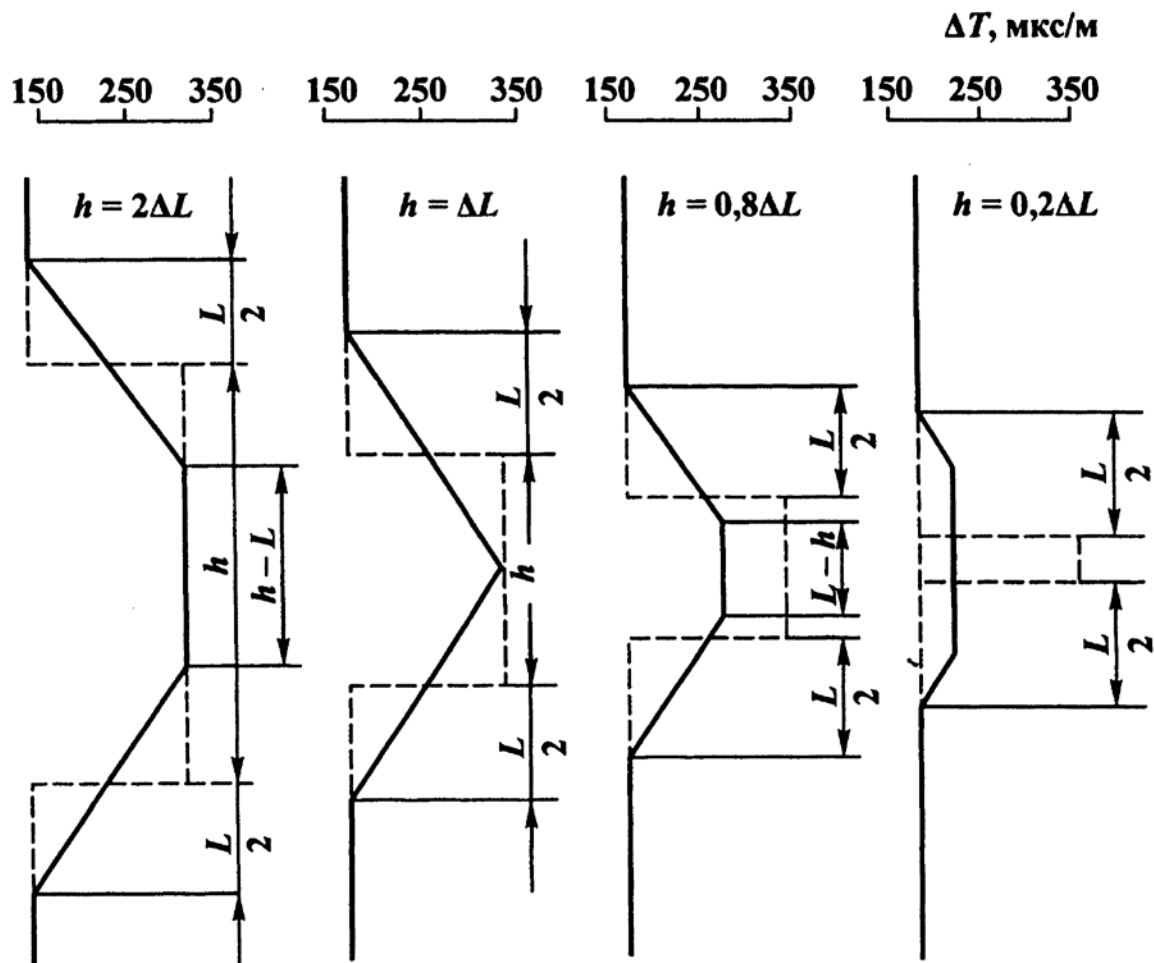
Задачи индивидуальной интерпретации

- Определение скоростей распространения упругих волн в горных породах;
- Литологическое расчленение пород;
- Определение характера насыщенности коллекторов (в комплексе с данными электрических и радиоактивных методов).

Оценка качества диаграмм. Значения интервального времени в некоторых средах [Латышова М.Г., 2007 г]

Среда	ΔT , мкс/м	Примечание
Большая каверна в скважине	580 – 600	Максимальные показания
Плотные известняки ($K_p < 1\%$)	155 – 160	Минимальные показания
Плотные доломиты	140 – 145	То же
Ангидриты	180 – 185	Промежуточные показания
Гипсы	175	То же
Незацементированная обсадная колонна	185	То же

Теоретические кривые интервального времени



ΔL – база зонда; h – толщина пласта

Акустические характеристики горных пород

Породы	Параметры продольных волн		
	V_p , м/с	ΔT_p , мкс/м	α_p , м ⁻¹
Песчаник	–	–	–
	3000 – 5700	175 – 333	1.1 – 1.6
Алевролит	–	–	–
	3800 – 4900	204 – 263	0.9 – 1.2
Глина	3000	333	1.38
	2000 – 3300	300 – 500	–
Аргиллит	–	–	–
	3300 – 4500	222 – 300	0.9 – 1.1
Известняк	–	–	–
	2600 – 7100	141 – 385	0.2 – 0.8
Доломит	–	–	–
	3000 – 7900	126 – 333	–
Мел	3200	312	–
	2600 – 3300	300 – 385	–
Ангидрит	5500	182	0.04
	5300 – 6100	164 – 189	–
Гипс	5750	174	0.04
	5700 – 5800	172 – 176	–
Галит (соль)	4800	218	0.04
	4200 – 4800	208 – 238	–

$$\Delta T_{\text{лит}} = \frac{\Delta T - \Delta T_{\text{гл}} K_{\text{гл}} - \Delta T_{\text{ж}} b K_{\text{п.нм}}}{1 - K_{\text{гл}} - b K_{\text{п.нм}}}$$

где $K_{\text{п.нм}}$ – кажущаяся пористость пласта по данным нейтронных методов с учетом влияния глинистости; $\Delta T_{\text{гл}}$, $\Delta T_{\text{ж}}$ – интервальные времена распространения упругой волны в чистых глинах и флюиде, заполняющем поровое пространство; $K_{\text{гл}}$ – коэффициент объемной глинистости пород; b – коэффициент, учитывающий влияние глубины залегания пласта через величину эффективного давления

$$b = \frac{1 + \lg P_{\text{эф}}}{2.6}$$

Определение литологии пород по параметру $\Delta T_{\text{лит}}$

$\Delta T_{\text{лит}}$, мкс/с	Характеристика породы
<110	Кавернозная либо загипсованная (в случае карбонатных пород), или имеет рассеянную глинистость
110 – 128	Доломиты
128 – 143	Доломито-известкового состава
143 – 160	Известняки
160 – 174	Известково-песчаного состава
174 – 198	Песчаники
>198	Микротрещиноватая (микронеоднородная) или газонасыщенная, либо характеризуется потерями первых вступлений на диаграмме ΔT_p , вследствие малых амплитуд продольной волны

Определение коэффициента пористости

Для определения коэффициента пористости обычно используют уравнение среднего времени с дальнейшим внесением поправок за уплотнение (эффективное давление) и нефтегазонасыщенность.

$$K_{\Pi} = \frac{\Delta T_{\Pi} - \Delta T_{СК}}{\Delta T_{Ж} - \Delta T_{СК}}$$

Значение интервального времени для некоторых породообразующих минералов

Минерал	ΔT_M , мкс/м	Минерал	ΔT_M , мкс/м
Кварц	164	Кальцит	155
Полевой шпат	170	Ангидрит	164
Слюды	178	Гипс	172
Доломит	142	Каменная соль	208 – 230

Результаты, полученные акустическим методом, используют при

- литологическом расчленении разреза,
- выделении коллекторов,
- определении их пористости и характера насыщения,
- контроля обводнения залежей при их разработке,
- при решении технических задач.