



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

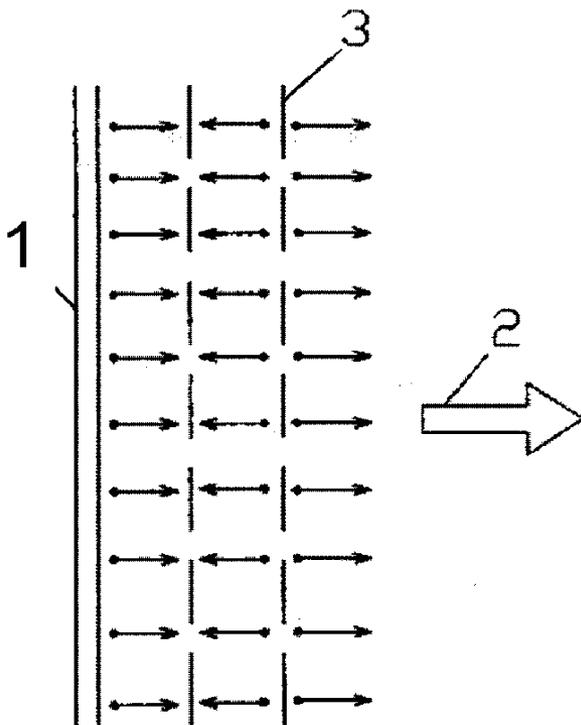
—продольные P ,

—поперечные S ,

—прямые гидроволны P_0 ,

—поверхностные трубные волны типа Стоунли, Лэмба, Рэлея.

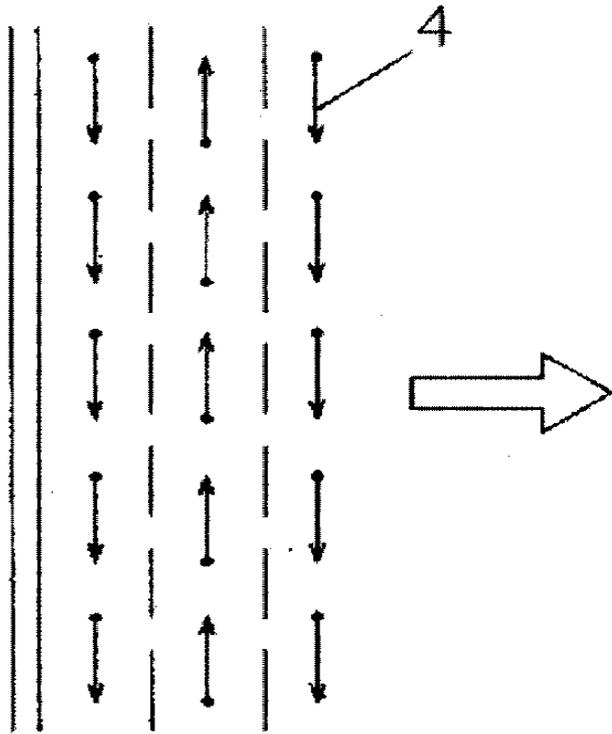
Продольные волны Р



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.

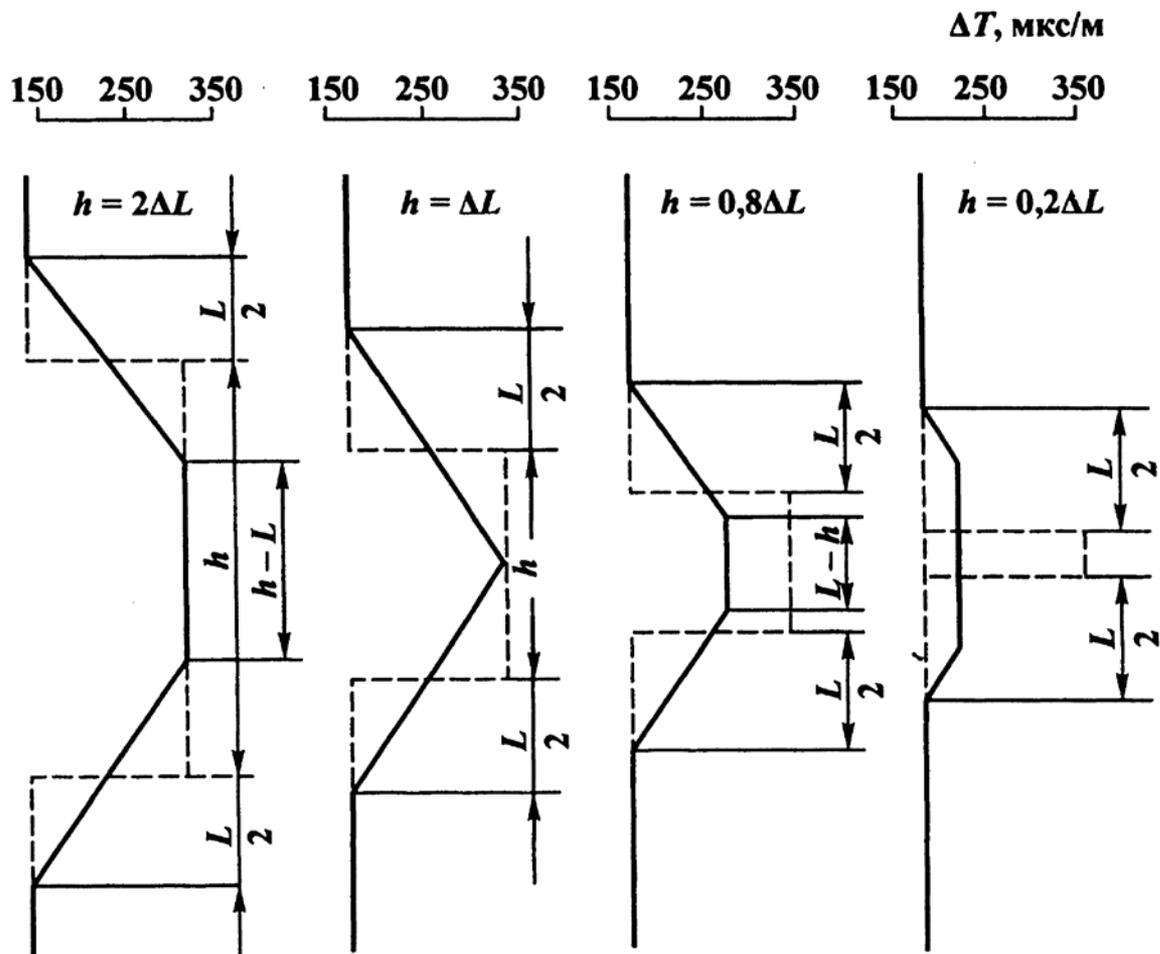
Задачи индивидуальной интерпретации

- 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

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.