

**А.9. МЕТОД ЯДЕРНО-МАГНИТНОГО КАРОТАЖА  
В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ  
(ЯДЕРНО-МАГНИТНЫЙ ТОМОГРАФИЧЕСКИЙ КАРОТАЖ)**

### Прибор ядерно-магнитного томографического каротажа ЯМТК

**ПРЕДНАЗНАЧЕН** для определения структуры порового пространства, фильтрационно – емкостных свойств, состава и свойств флюидов на основе измерения и обработки кривой релаксации ( $T_2$ ) флюидов, заполняющих поровое пространство.

#### ПРИМЕНЯЕТСЯ

- при выполнении спускоподъемных операций на кабеле:
  - в открытых стволах вертикальных и слабонаклонных (до  $30^\circ$ ) скважин;
- при выполнении спускоподъемных операций на бурильных трубах:
  - в открытых стволах сильнонаклонных и горизонтальных скважин.

Возможно применение в закрытых стволах скважин специальной конструкции со стеклопластиковыми хвостовиками. Промывочная жидкость – непроводящая (РНО, ИБР) и проводящая (с УЭС более  $0.04 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) без добавок утяжелителей на основе магнитных минералов (гематит и др.). Тип используемого кабеля – трехжильный. Типы используемых источников поля:

- постоянный магнит с рабочим диапазоном температур от минус  $50$  до плюс  $150^\circ\text{C}$ ;
- постоянное магнитное поле напряжённостью  $140\text{-}165 \text{ Гс}$ ;
- радиочастотное поле частотой  $600\div 700 \text{ кГц}$  напряжённостью  $1.2 \text{ Гс}$ .

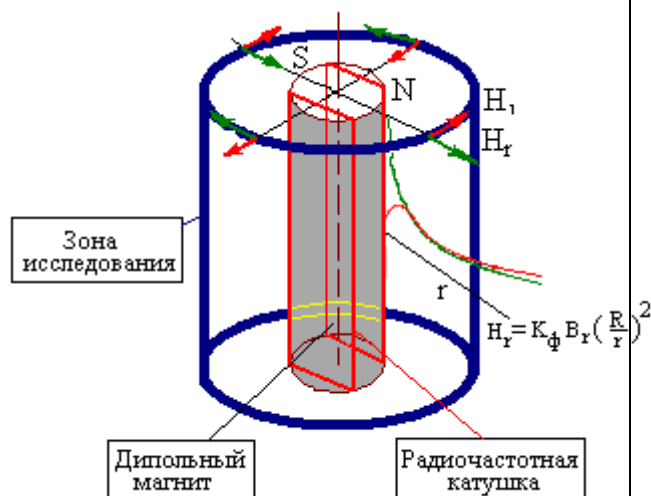
Формула зонда - дипольный градиентный зонд.

#### РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ:

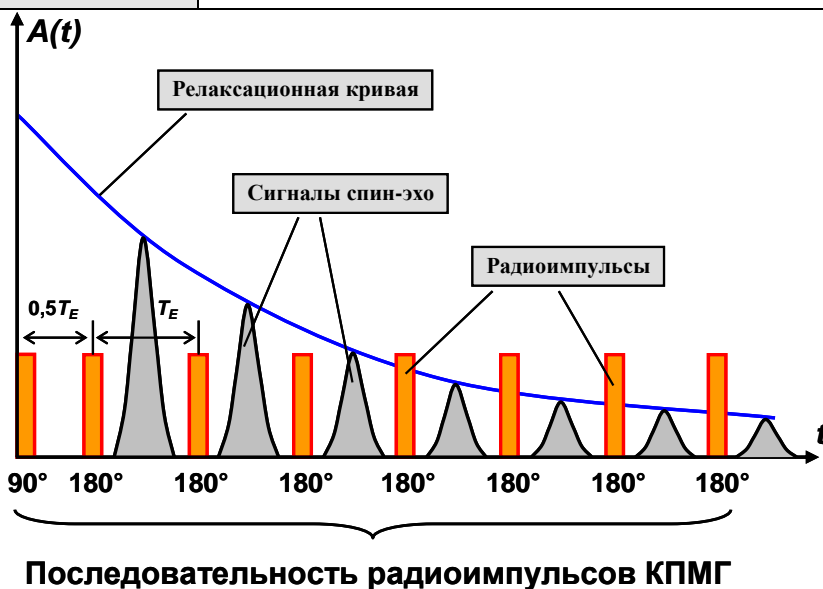
- изучение структуры порового пространства осадочных, магматических, метаморфических пород и на этой основе определение фильтрационно-емкостных свойств пород, в том числе:
  - коэффициент общей пористости, независимый от литологии пород;
  - коэффициент эффективной пористости (в карбонатах дополнительно – с выделением доли каверновой пористости);
  - коэффициент остаточной водонасыщенности и выделение долей капиллярно-связанной воды и воды глин;
  - коэффициент проницаемости.
- выделение наличия, состава и свойств остаточных углеводородов в эффективных породах.



Зонд прибора ЯМТК с помощью постоянного магнита создает в окружающем его пространстве магнитное поле  $H_r$ . Это поле, воздействуя на ядра водорода, вызывает намагниченность пластовых флюидов (вода, нефть, газ). Для возникновения эффекта ядерно-магнитного резонанса зондом формируется импульсное радиочастотное поле  $H_1$ , направленное в каждой точке пространства перпендикулярно постоянному полю  $H_r$ . Частота радиочастотного поля равна частоте прецессии ядер водорода в поле магнита в заданной зоне исследования. Так как равенство этих двух частот соблюдается только в узком цилиндрическом слое, коаксиальном оси зонда, то и сигнал ЯМР формируется только в этом слое.

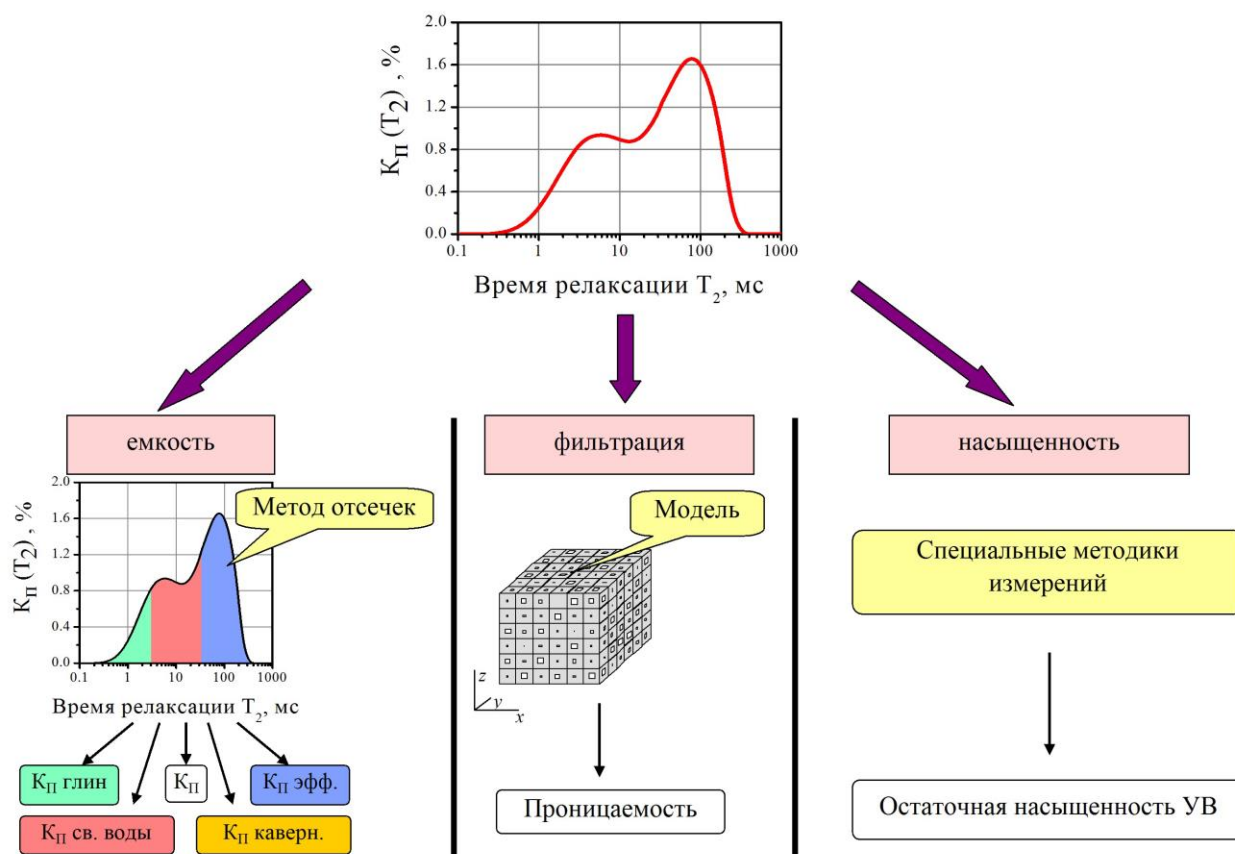


Для измерения релаксационной кривой  $T_2$  используется последовательность радиоимпульсов Карра-Перселла-Мейбум-Гилла. После каждого  $180^\circ$  импульса возникает сигнал спин-эхо. Релаксационная кривая является огибающей амплитуд сигналов спин-эхо.



Импульсная последовательность характеризуется тремя параметрами – временем намагничивания  $T_w$ , временем раздвижки между импульсами  $T_e$ , числом импульсов  $N$ . В аппаратуре ЯМТК реализовано более 10 режимов измерений с различной комбинацией величин  $T_w$  (0.75 - 8 с),  $T_e$  (0.8 - 4.8 мс),  $N$  (400 - 1000). Базовая калибровка выполняется в эталонировочной емкости с водой и обеспечивает калибровку амплитуды релаксационной кривой в единицах пористости. Результаты калибровки записываются в память прибора. Полевые калибраторы не требуются.

## Схема обработки данных ЯМТК



Исходной информацией для обработки является зарегистрированная релаксационная кривая, представляющая собой зависимость сигнала ЯМР от времени измерения. Из нее с использованием специальных математических процедур рассчитывается спектр ЯМТК, который представляет собой распределение пористости по времени поперечной релаксации  $K_{\Pi}(T_2)$ . Так как время релаксации пропорционально размеру пор, то спектр качественно характеризует и распределение пористости по размерам пор (см. следующий рисунок). Дальнейшая обработка производится на основе полученных спектров ЯМТК.

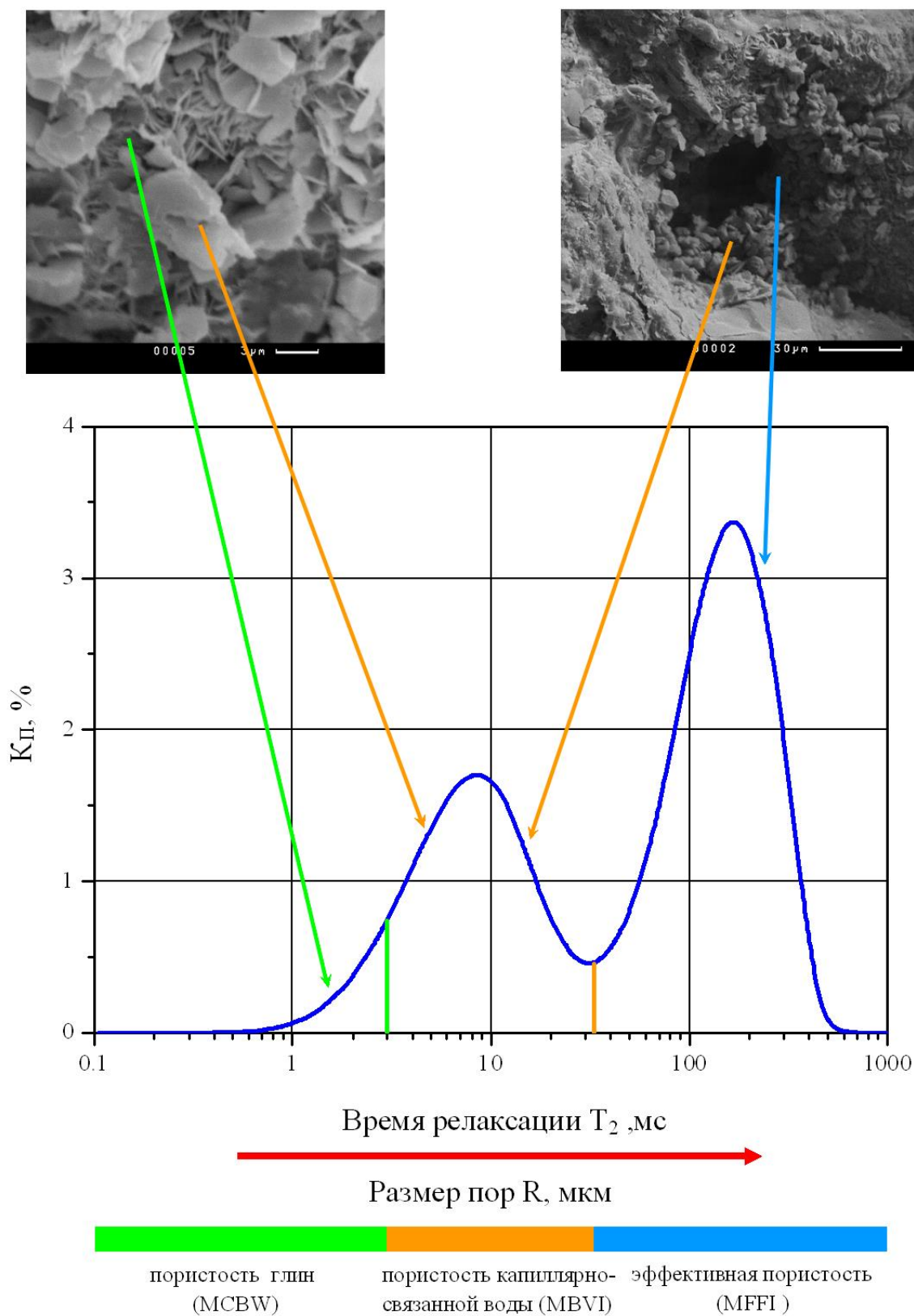
Распределение пористости по «бинам» отражает пористость, приходящуюся на определенные интервалы времени  $T_2$  (в мс), называемых «бинами». Биновое представление позволяет увидеть соотношение пористости, приходящейся на поры различного размера. Чем больше номер бина, тем больших размеров поры формируют его емкость.

Характеристики емкости ( $K_{\Pi}$  эфф.,  $K_{\Pi}$  св. воды,  $K_{\Pi}$  каверновая,  $K_{\Pi}$  глин) оцениваются путем интегрирования спектра в заданных интервалах времен релаксации, соответствующих группам пор определенных размеров. Капиллярно связанная пористость и пористость глин вместе составляют емкость, заполненную остаточной водой.

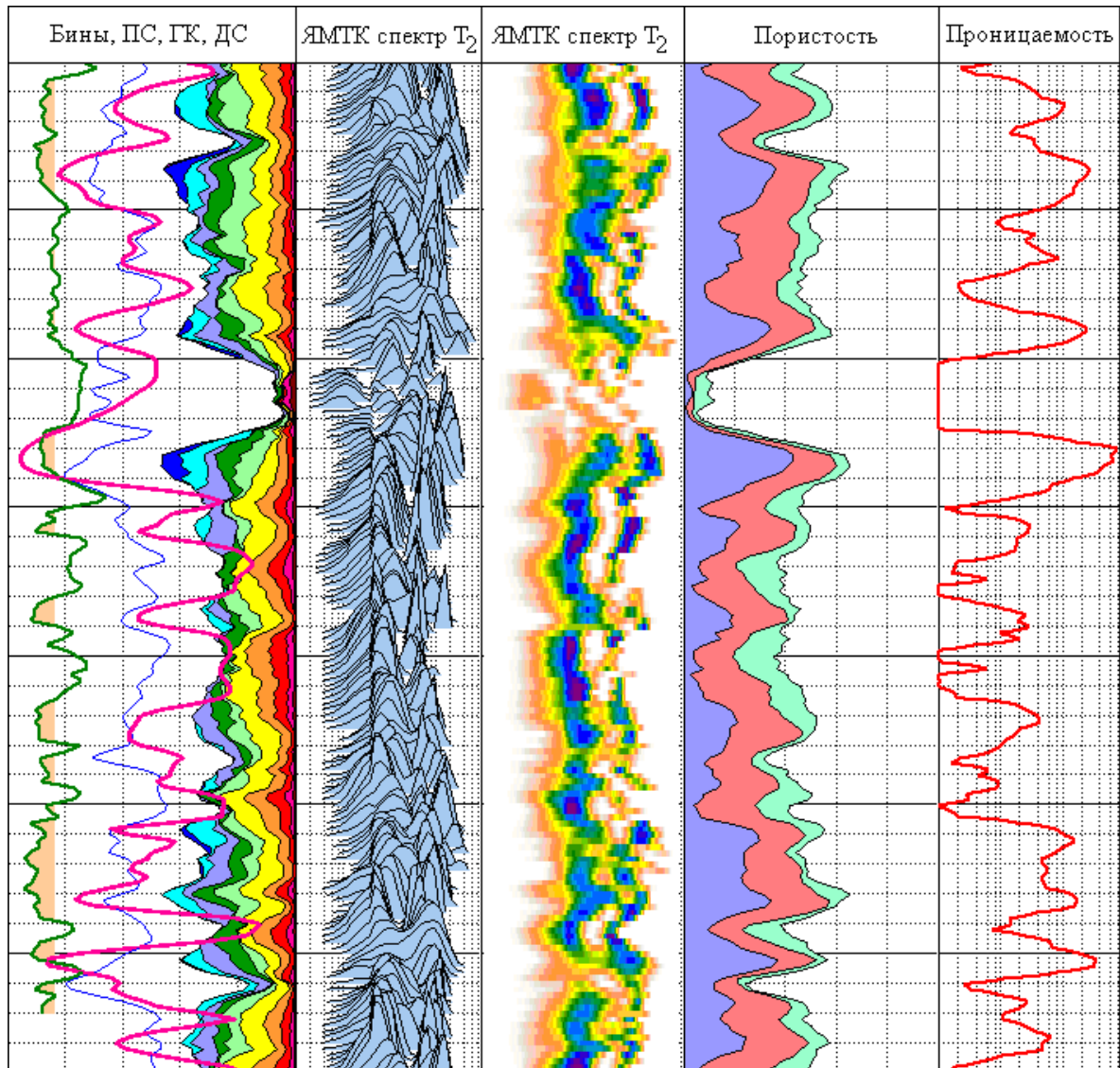
Для оценки абсолютной проницаемости могут использоваться несколько подходов. В одном из них  $K_{пр}$  рассчитывается непосредственно из спектров ЯМТК по специальной методике с использованием сеточной капиллярной модели пористой среды.

Для изучения эффектов остаточной насыщенности применяются специальные методики измерений и приемы обработки.

## Петрофизическая информативность спектров ЯМТК



## Пример записи



**Структуру порового пространства** характеризует спектр ЯМТК, отражающий распределение пористости (ось ординат) по времени поперечной релаксации  $T_2$  (ось абсцисс) для каждой точки глубины. На планшете спектры приведены в трех формах представления, облегчающих визуальный анализ:

- стандартной («волновая картина», поле 2);
- в виде цветовой диаграммы («амплитудная картина», поле 3);
- в виде распределения пористости по бинам (поле 1).

Информация спектров позволяет судить об особенностях структуры порового пространства (диапазон изменения размеров пор, преобладание определенных групп пор и др.). Так, биновое представление (поле 1) позволяет увидеть соотношение пористости, приходящейся на поры различного размера – синий цвет характеризует наиболее крупные по размерам поры, красный – мелкие.

**Информация о ёмкости порового пространства** приведена в поле 4 в виде объемной модели. Найденная емкость подразделяется на эффективную (показана синим цветом), капиллярно-связанную (темно-красный) и пористость глин (зеленый). Полная пористость по ЯМТК соответствует сумме всех выделенных компонент пористости. Она показана как огибающая черная линия.

### Технические данные и характеристики приборов ЯМТК

	ЯМТК-150(110)-120/100	ЯМТК-150(120)-120/80	ЯМТК-150(120)-150/120	ЯМТК-П	ЯМТК-А	ЯМР релаксо-метр
Тип прибора	центрируемый	центрируемый	центрируемый	прижимной	кабельно-автономный	-
Макс. температура, °С	120	120	150	120	110	-
Макс. давление, МПа	100	80	120	80	80	-
Длина прибора, м	7.5	7.5	7.5	7.5	13.0	-
Масса прибора в собранном виде, кг	275	275	275	275	425	10
Диаметр исследуемых скважин, мм	132 ÷ 260	143 ÷ 260	143 ÷ 260	190 ÷ 300	132 ÷ 260	-
Продолжительность непрерывной работы, ч	10	10	10	10	48 (деж.) 10 (изм.)	-
Постоянное магнитное поле, Гс	≈ 140	≈ 140	≈ 140	≈ 165	≈ 140	≈ 280
Радиочастотное поле, Гс	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	2.5
Частота, кГц	≈ 600	≈ 600	≈ 600	≈ 700	≈ 600	≈ 1200
Градиент в зоне исследования, Гс/см	20	20	20	20	20	1,10,20
Минимальное время раздвижки Те, мс	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.3
Количество эх	до 1000	до 1000	до 1000	до 1000	до 1000	до 8000
Скорость каротажа, м/час	100	100	100	100	100	-
Диапазон измерения амплитуды сигнала, % пор.	0 ÷ 100	0 ÷ 100	0 ÷ 100	0 ÷ 100	0 ÷ 100	0 ÷ 100
Погрешность измерения пористости (3 накопления), % пор.	1	1	1	3 (6 накоплений)	1	0.1 (10 накоплений)
Диапазон измерения времени поперечной релаксации T <sub>2</sub> , мс	1 ÷ 3000	1 ÷ 3000	1 ÷ 3000	1 ÷ 3000	1 ÷ 3000	0.25 ÷ 3000
Вертикальное разрешение, мм	620	620	620	620	620	Керн (Ø=30 мм, h=35мм)
Диаметр зоны исследования, мм	340(240)	340(280)	340(280)	глубинность 50	340(240)	
Толщина зоны исследования, мм	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1	
Сопротивление бурового раствора, Ом м	> 0.04	> 0.04	> 0.04	> 0.01	> 0.07	-

### Программа обработки данных ЯМТК NMR Processor

Программа предназначена для обработки данных ядерно-магнитного каротажа с использованием метода регуляризации. Обработка основана на получении спектров времен релаксации и вычислении по ним основных петрофизических характеристик пластов.

Применяется при исследовании нефтегазовых скважин методом ядерно-магнитного каротажа в сильном поле, позволяет проанализировать результаты измерения и провести оценки фильтрационно-емкостных характеристик горных пород.

Основные расчетные возможности комплекса:

- расчет дифференциальных спектров времен релаксации;
- расчет интегральных спектров времен релаксации;
- расчет парциальных спектров времен релаксации;
- расчет бинов;
- расчет общей пористости;
- разделение общей пористости на составляющие: пористость глин, эффективная пористость, капиллярно-связанная вода;
- расчет проницаемости по капиллярно-решеточной модели;
- расчет проницаемости по модели Тимура;
- расчет проницаемости по модели Тимура-Коатса;
- расчет проницаемости по модели среднего T2;
- предварительная фильтрация сигнала с помощью НЧ-фильтра;
- предварительная фильтрация сигнала с помощью Wavelet –фильтра;
- вычитание спектров (с целью определения насыщенности пласта разными типами флюидов);
- вычитание релаксационных кривых;
- возможность поинтервальной обработки (перерасчет отдельных интервалов с использованием скорректированных параметров, изменение отсечек для получения эффективной пористости и пористости глин на отдельных интервалах и т.д.).

Свидетельство Роспатента об официальной регистрации программы для ЭВМ №2003612705



