

**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  $1.2 \text{ Гс}$ .

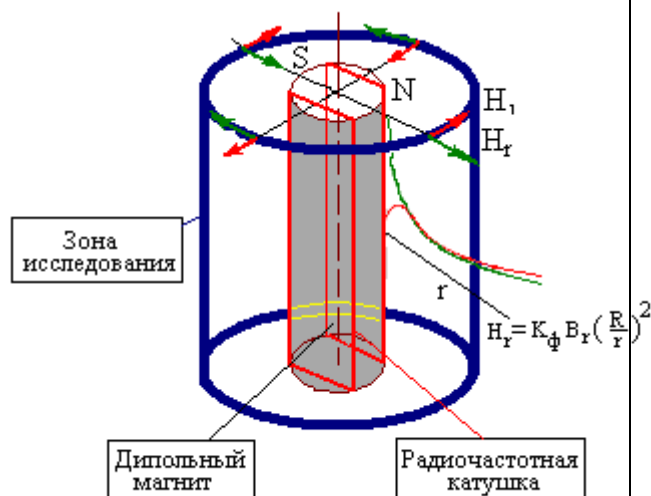
Формула зонда - дипольный градиентный зонд.

### РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ:

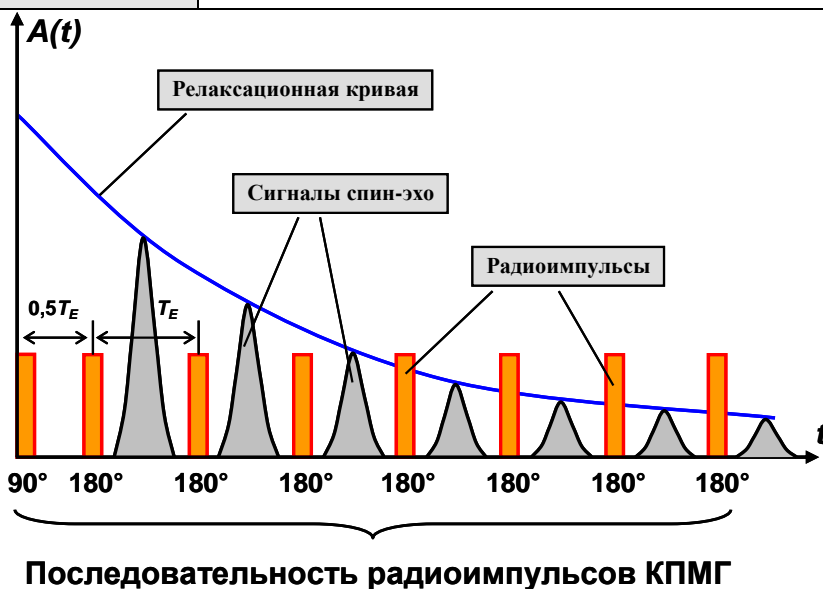
- изучение структуры порового пространства осадочных, магматических, метаморфических пород и на этой основе определение фильтрационно-емкостных свойств пород, в том числе:
  - коэффициент общей пористости, независимый от литологии пород;
  - коэффициент эффективной пористости (в карбонатах дополнительно – 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.

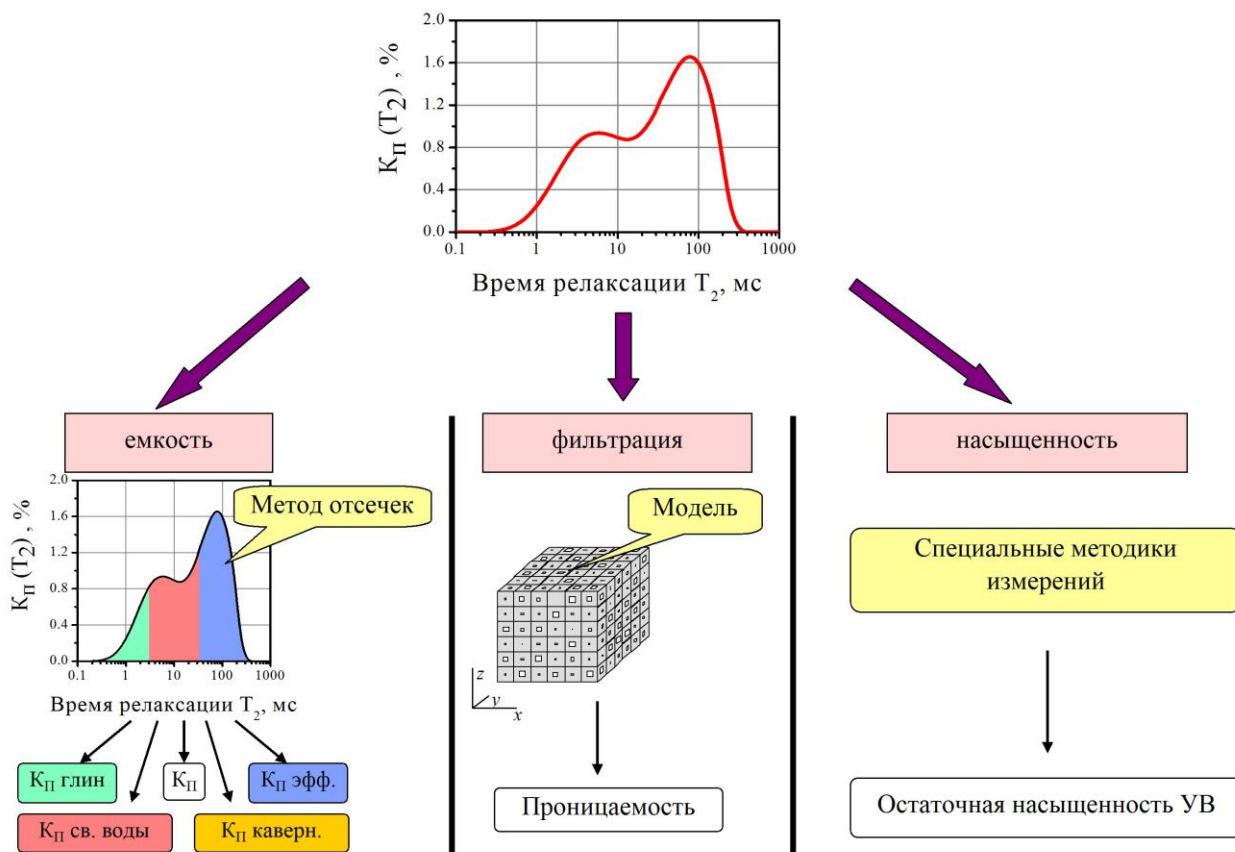


Для измерения релаксационной кривой  $T_2$  используется последовательность радиоимпульсов Карра-Перселла-Мейбум-Гилла. После каждого  $180^\circ$  импульса возникает сигнал спин-эхо. Релаксационная кривая является огибающей амплитуд сигналов спин-эхо.



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  $K_{II}(T_2)$ . 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.

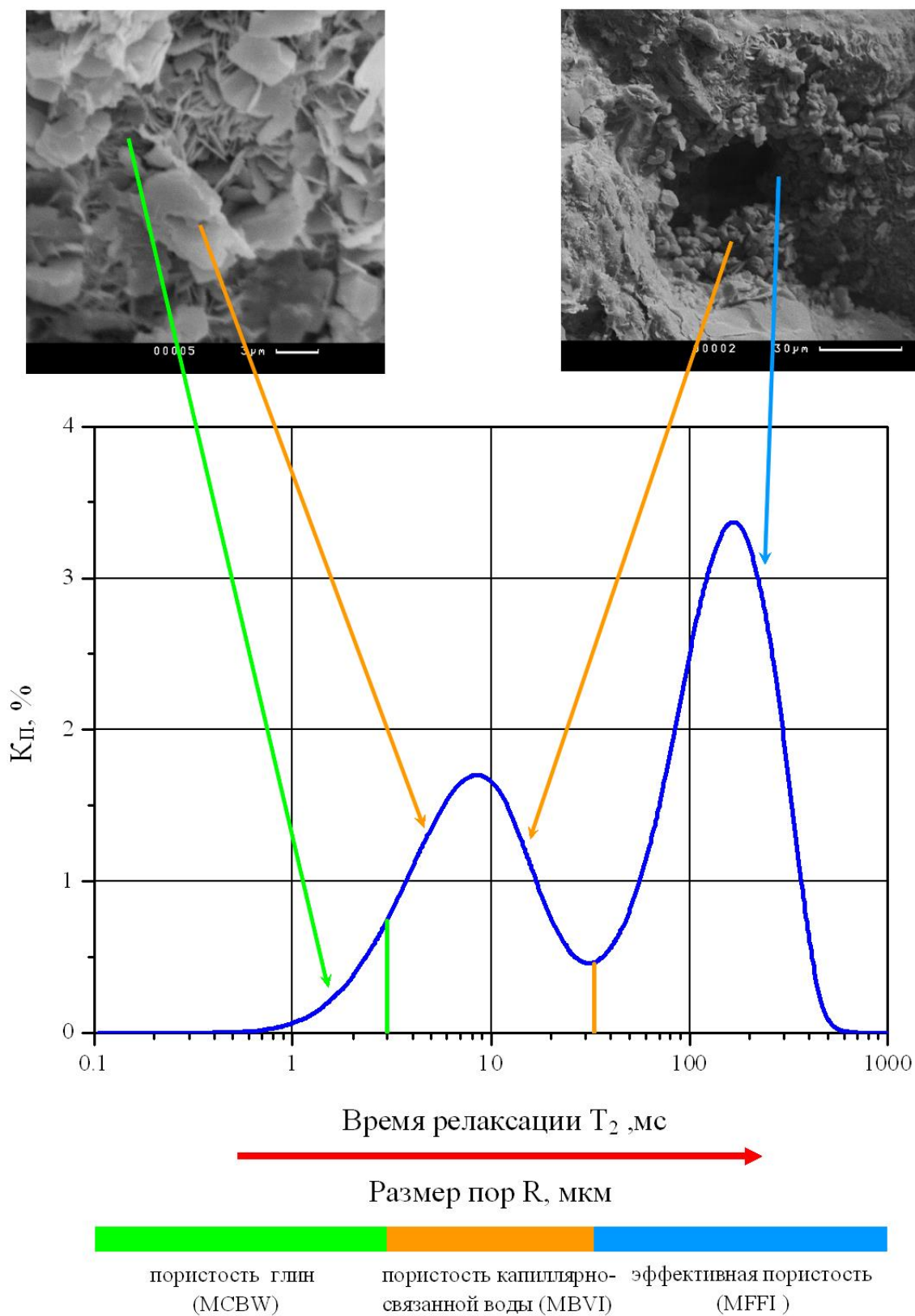
Распределение пористости по «бинам» отражает пористость, приходящуюся на определенные интервалы времени  $T_2$  (в мс), называемых «бинами». Биновое представление позволяет увидеть соотношение пористости, приходящейся на поры различного размера. Чем больше номер бина, тем больших размеров поры формируют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

Характеристики емкости ( $K_{II}$  эфф.,  $K_{II}$  св. воды,  $K_{II}$  каверновая,  $K_{II}$  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.

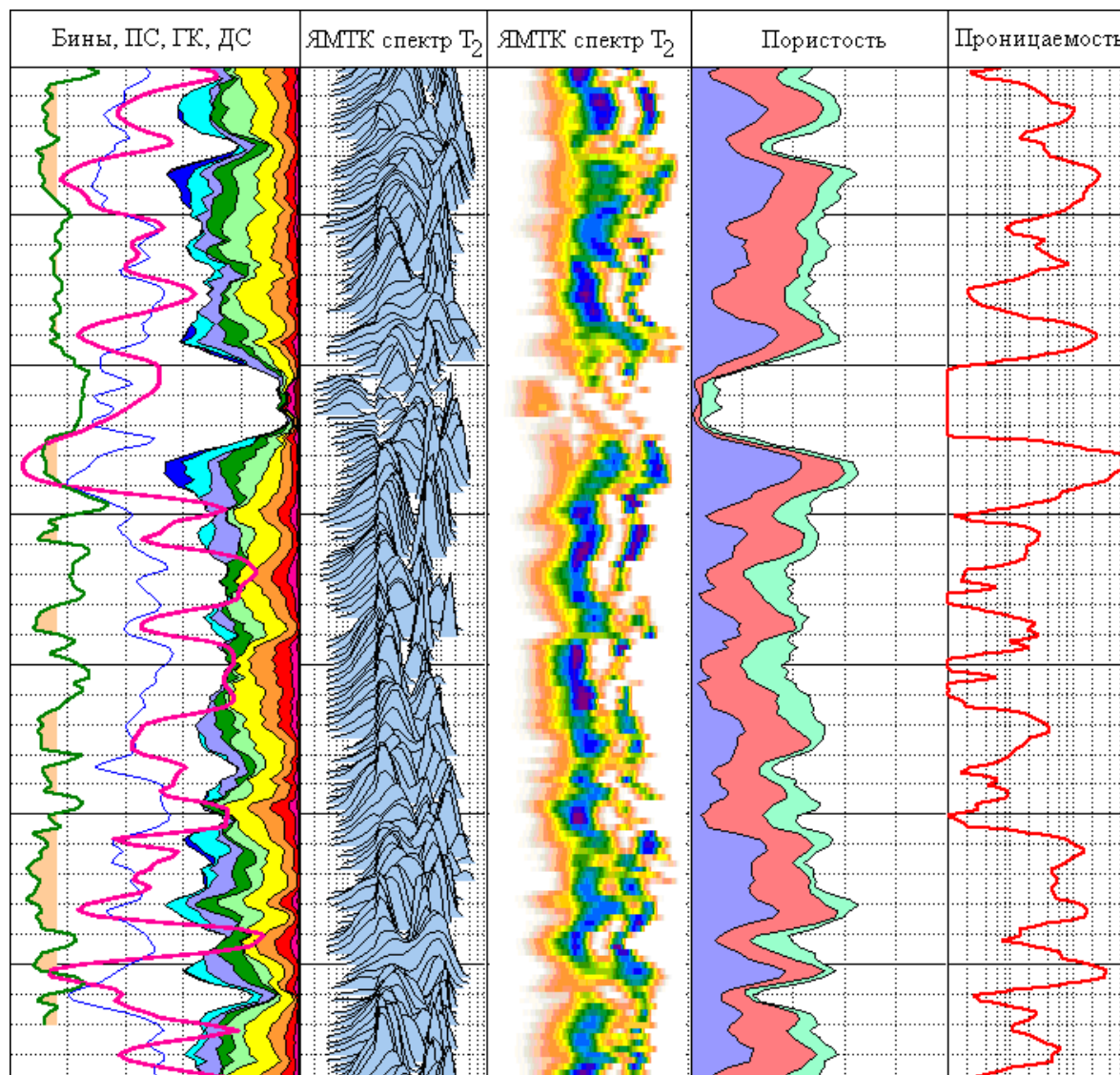
Для оценки абсолютной проницаемости могут использоваться несколько подходов. В одном из них  $K_{пр}$  рассчитывается непосредственно из спектров ЯМТК по специальной методике с использованием сеточной капиллярной модели пористой среды.

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.)<br>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<br>(6 накоплений) | 1                      | 0.1<br>(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<br>(Ø=30 мм,<br>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



