

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЯМР-РЕЛАКСОМЕТРА

Муравьев Л.А., Доломанский Ю.К. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Импульсный ядерный магнитный резонанс является одним из перспективных методов исследования фильтрационно-емкостных свойств образцов. Разработан вариант программы обработки и геолого-геофизической интерпретации релаксационных кривых с учетом моделей среды и предварительной геологической информации. Предлагаемая методика исследований позволит работать не только с керном в лабораторных условиях, но и со шламом непосредственно на буровой, при прохождении скважины.

Ядерный магнитный резонанс, портативный ЯМР-релаксометр, моделирование релаксационной кривой, фильтрационно-емкостные свойства, исследование керна.

PORTABLE NMR-RELAXOMETER SOFTWARE

Muraviev L.A., Dolomanski Yu.K. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. Impulse nuclear magnetic resonance is the one of perspective filtration-capacitive properties estimation methods. Software for processing and geological-geophysical interpretation of relaxation curves with taking to account medium models and preliminary geological information is developed. Proposed analysis methodic alloys to work not only with core in laboratory but with mud directly in the oil-rig while drilling.

Nuclear magnetic resonance, portable NMR-relaxometer, relaxation curve modelling, filtration-capacitive properties, core analyses.

Метод импульсной спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) используется в физике, химии и биологии на протяжении многих лет. Попытки применить ЯМР в геофизике начались еще в начале 50-х годов двадцатого века, когда были разработаны первые скважинные приборы, использующие ЯМР в земном поле для анализа пластовых флюидов (Brown et al., 2001). Однако в настоящее время ЯМР-метод в России достаточно медленно внедряется в производственные процессы для определения петрофизических свойств среды. Основной аппаратурой являются ЯМР-каротажные приборы (ЯМК) для исследования скважин и лабораторные приборы (ЯМР) для исследований керна.

Принцип получения сигнала методом ЯМР

Для наблюдения явления ядерного магнитного резонанса, необходимо создать макроскопическую намагниченность в образце (Фаррар, Беккер, 1973). Воздействуя на среду или образец сильным постоянным магнитным полем, мы создаем неравновесный магнитный момент ядер протонов в водородосодержащих молекулах флюидов.

Ось измерительной катушки перпендикулярна внешнему магнитному полю. Для регистрации сигнала в ней необходимо отклонить макроскопическую намагниченность на угол 90° . Это достигается воздействием на образец переменного поля с резонансной частотой $\omega = \gamma \cdot B$ (γ - гиромагнитное отношение протона, B – внешнее магнитное поле), после чего в катушке возникает ЭДС, на частоте прецессии. Скорость спада амплитуды сигнала является временем релаксации T_2 .

Время релаксации зависит от типа взаимодействия между молекулами, расстояния до границы флюид-твердое тело, общих термодинамических условий. На границе твердого тела и жидкости флюид находится в более упорядоченном состоянии, в котором релаксация происходит быстрее. Таким образом, наблюдаемый сигнал является суперпозицией экспоненциально затухающих сигналов от компонент флюида, находящегося в порах и капиллярах различного размера. Проведя временное разложение сигнала на составляющие члены, можно оценить количество флюида сильно (малые времена релаксации) или

слабо (большие) связанного с породой. Это позволяет получить распределение пустотного пространства по размерам и выделить долю подвижного флюида, которая может быть извлечена.

Для получения большой амплитуды сигнала за рубежом и в России применяют магнитное поле величиной от сотых до десятых тесла. Сигнал прецессии наблюдают методом спинового эха (Фаррар, Беккер, 1973; Coates et al., 2000), с помощью последовательности радиочастотных импульсов в последовательности Карра-Парселла-Мейбума-Гилла. Для получения максимального отношения сигнал/шум необходимо обеспечить однородность поля лучше 10^{-3} по всему объёму исследуемого образца. В противном случае градиент поля увеличит скорость затухания сигнала вследствие расфазировки прецессии магнитных моментов отдельных атомов.

Другим фактором, вносящим погрешность в результаты измерений, является не точное совпадение частоты прецессии ($\omega = \gamma B$) с частотой заполнения радиочастотных импульсов и их длительностью. Решение уравнений Блоха для стационарного случая методом перехода во вращающуюся систему координат показывает, что вектор макроскопической намагниченности при воздействии на него «90-градусного импульса» ложится в плоскость ортогональную постоянному полю, но его направление не всегда совпадает с осью приемной катушки (Фаррар, Беккер, 1973). Это приведет к погрешностям при определении пористости.

Для устранения этих недостатков необходимо использовать лабораторную ЯМР-аппаратуру с постоянным поляризующим полем, значение которого сравнимо с полем ЯМК-аппаратуры, что позволяет использовать её для предварительной настройки и корректной интерпретации результатов, полученных при каротаже. Использование магнитной системы релаксометра из материала с низким температурным коэффициентом индукции позволит избежать необходимости термостабилизации, существенно уменьшить размеры

прибора в целом для применения его на скважине в процессе бурения.

Процесс получения ЯМР-сигнала состоит из трех основных шагов:

- намагничивание образца (поляризация ядер);
- поворот намагниченности (первый, «90-градусный» импульс последовательности);
- использование последовательности импульсов для получения кривой релаксации.

Последовательность радиочастотных импульсов Карра-Пурселла-Мейбума-Гилла (рис. 1.) позволяет регистрировать релаксационные процессы, вызванные тепловыми столкновениями молекул.

Основными параметрами импульсной последовательности являются:

T_E – интервал между эхо-сигналами, а также между 180-градусными импульсами;

N_b – число В-импульсов – общее число 180-градусных импульсов;

T_w – время задержки (поляризации, интервал между измерениями);

N – общее число запусков (повторений) импульсной последовательности.

Для улучшения соотношения сигнал / шум данная последовательность, повторяется несколько раз. Измеренный сигнал (релаксационная кривая) в оцифрованном виде поступает в компьютер, где преобразовывается в распределение по временам релаксации (рис. 2).

На рис. 3 показано соотношение между размерами пор и временами релаксации, заполненных одинаковым флюидом.

Физические процессы на границе твердое тело-жидкость приводят к упорядочиванию молекул флюида вблизи стенки поры, что приводит к уменьшению времени

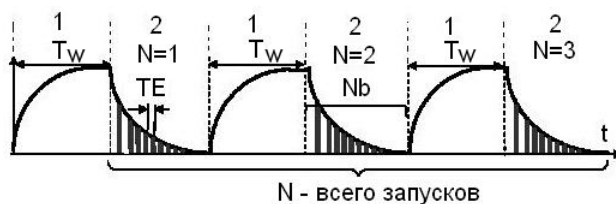


Рис. 1. Импульсная последовательность Карра-Пурселла-Мейбума-Гилла и ее параметры: T_E , T_w , N , N_b .

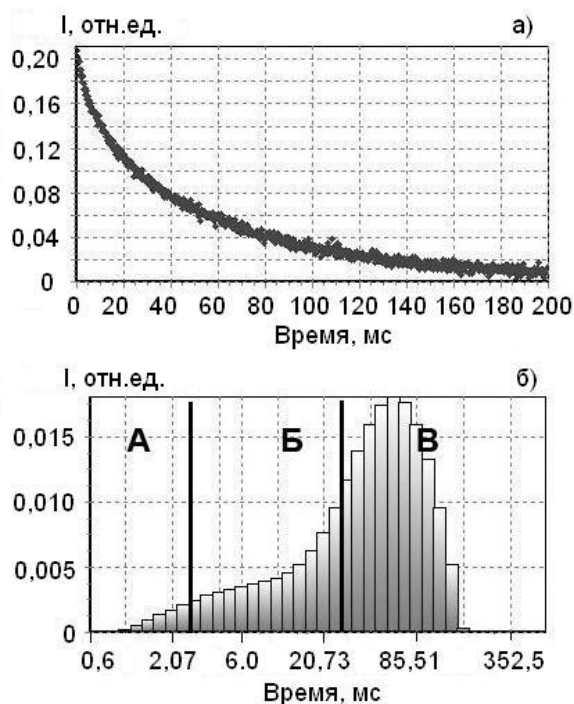


Рис. 2. Релаксационная кривая: а) – исходная кривая; б) – разложение на времена релаксации (непрерывный спектр); распределение флюида по степени связности: А – глинисто-связанный, Б – капиллярно связанный, В – свободный

релаксации для этих частиц. В порах большого размера малое соотношение поверхности к объему S/V и, следовательно, времена релаксации возрастают. У маленьких пор это соотношение наиболее высокое и наиболее короткие времена T_2 .

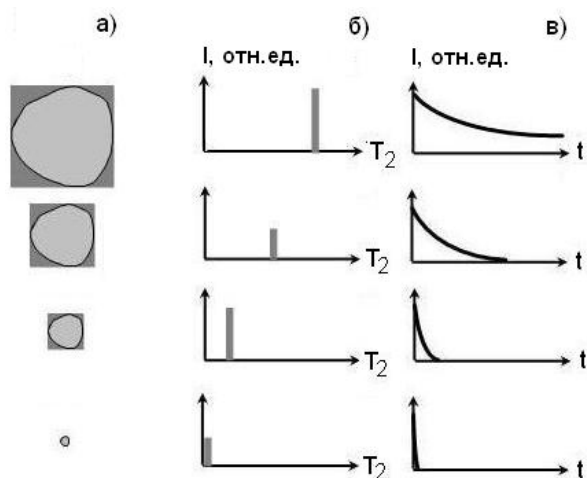


Рис. 3. Иллюстрация зависимости времени релаксации от размера пор (0,05-20 мкм): а) – поры разного диаметра, б) – время релаксации, в) – релаксационная кривая

Таким образом, получаемое распределение времен релаксации совпадает с распределением пустотного пространства по размерам (Coates at all., 2000).

Программное обеспечение ЯМР-релаксометра

Для правильного получения петрофизических характеристик образца необходимо задавать параметры (T_E , T_w , N , N_b) в нужном диапазоне. Для этого выбран вариант программы и разработан интерфейс, позволяющей уменьшить время измерения для возможного увеличения скорости ЯМК.

В программное обеспечение введены возможности автоматической подстройки резонансной частоты, длительности радиочастотных импульсов. Для удобства работы с образцами различных петрофизических свойств, программа позволяет задавать следующие параметры: время поляризации, интервал между радиочастотными импульсами, необходимое количество повторений импульсной последовательности для достижения оптимального соотношения сигнал / шум. Общий вид рабочего окна программы «ЯМР-релаксометр» приведен на рис. 4.

Основные режимы работы с программой:

- измерение сигнала образца;
- калибровка;
- моделирование ЯМР-эксперимента;
- интерпретация сигнала (разложение в спектр);
- работа с архивом измерений.

Измерение сигнала и калибровка аппаратуры

Общее время регистрации одной релаксационной кривой равно произведению количества импульсов на интервал между ними $T_E \cdot N_b$. Параметры T_E и N_b необходимо выбирать так, чтобы релаксационный процесс, во-первых, полностью закончился за этот промежуток времени, и, во-вторых, занял по возможности наиболее полно этот интервал.

За время T_w (между импульсными последовательностями) должна восстановиться намагниченность, создаваемая в из-

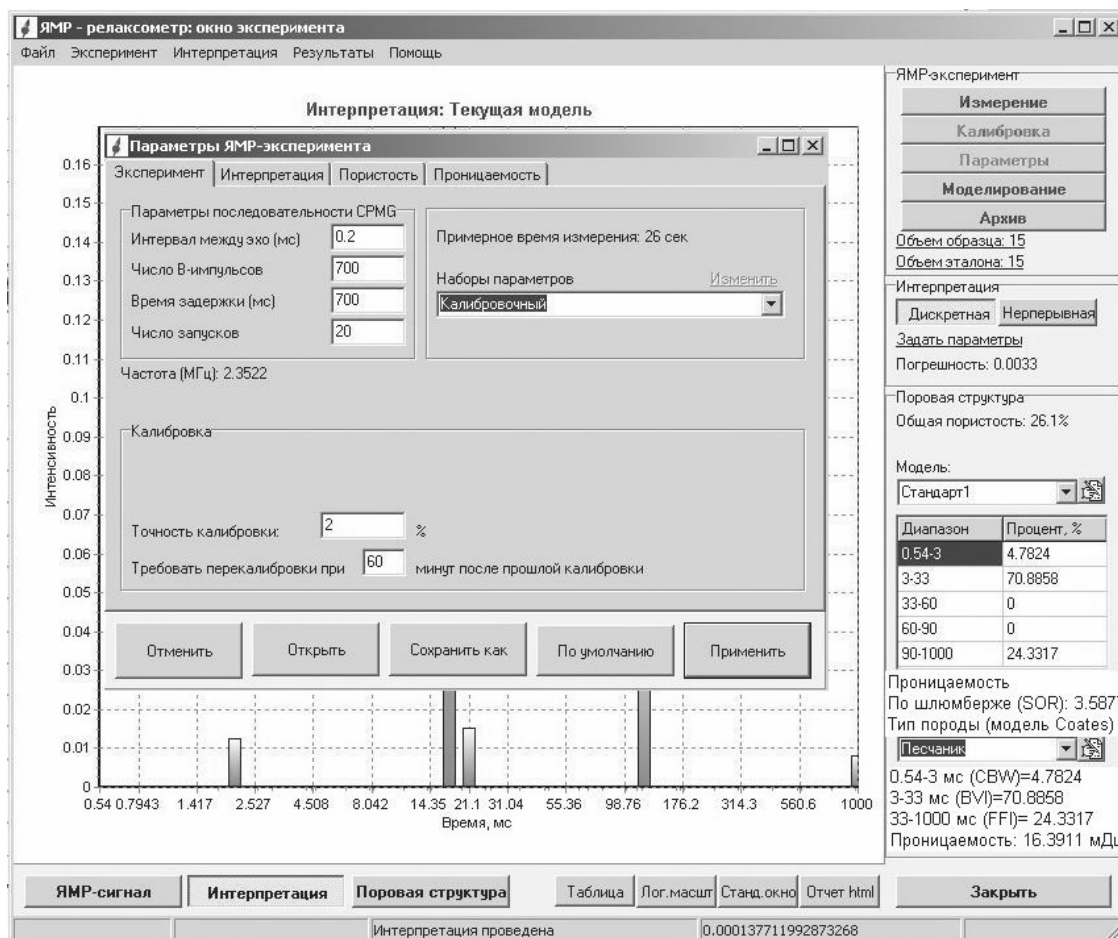


Рис. 4. Внешний вид интерфейса программы ЯМР-аппаратуры. Открыто окно параметров эксперимента

меряем образце внешним постоянным магнитным полем. Для восстановления намагниченности необходимо время, примерно, в 3-4 раза большее, чем максимальное время релаксации для исследуемого флюида.

Выбор значений параметров эксперимента зависит только от конкретного образца, поэтому выполняется оператором путем последовательных экспериментов и оценки вида полученной релаксационной кривой.

Калибровка ЯМР-релаксометра проводится перед началом серии измерений и включает в себя два основных этапа:

- подстройка резонансной частоты генератора ;
- измерение сигнала от эталонного образца и сохранение его амплитуды в качестве единичной.

Необходимость подстройки частоты вызвана колебаниями температуры в поле-

вых условиях на скважине (от 15 °С до 35 °С), а значит и температуры магнитов, создающих постоянное поле.

Начальная амплитуда ЯМР-сигнала пропорциональна числу поляризованных ядер водорода в поровом флюиде. Таким образом, сопоставляя сигнал измеряемого образца с сигналом эталонной емкости, заполненной водой (т.е. средой со 100% водонасыщенностью), и, введя поправку на соотношение объемов образца и эталона, можно определить пористость образца.

Введена возможность автоматического напоминания о необходимости калибровки перед началом измерений и в процессе работы с задаваемым интервалом (около 2-х часов).

Моделирование ЯМР-эксперимента

Средство моделирования ЯМР-эксперимента позволяет пользователю задавать амплитуды и времена релаксации компонент «модельного» флюида, и

получать релаксационную кривую, что позволяет планировать выбор параметров для измерения реального образца (рис. 5).

Пользователем задаются:

- название образца;
- объем образца и эталона;
- параметры релаксационной кривой: число составляющих кривую экспоненциальных членов, амплитуды и времена релаксации для каждого из них;
- амплитуда шума;
- градиент магнитного поля;
- коэффициент диффузии.

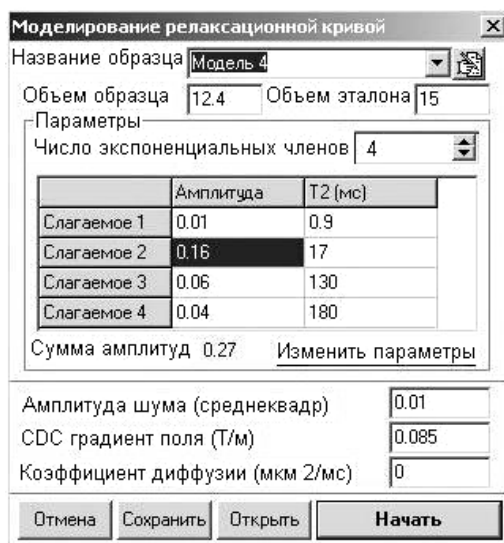


Рис. 5. Окно параметров моделирования ЯМР-эксперимента

Математическая модель, применяемая в режиме моделирования представляет сигнал релаксации в виде экспоненциального ряда:

$$y(t) = [S_1 \cdot e^{-t/T_1} + S_2 \cdot e^{-t/T_2} + \dots + S_n \cdot e^{-t/T_n}] \cdot e^{-t/R} + noise$$

$$R = \frac{1}{12} \cdot (\gamma \cdot G \cdot t_i)^2 \cdot D,$$

где n – число отдельных релаксационных пиков,
 $S_1, S_2 \dots S_n$ – амплитуды релаксационных пиков,
 $T_1, T_2, \dots T_n$ – соответствующие им времена релаксации,
 $t_i = TE \cdot i$, где i – порядковый номер эхо-сигнала,

γ – гиромагнитное отношение протона,
 G – величина постоянного градиента магнитного поля (Т/м),
 D – коэффициент диффузии, описывающий движение молекул в образце ($\text{мк}^2/\text{мс}$).
 Для многих веществ эти значения могут быть получены в справочной литературе.
 $Noise$ – нормально распределенный «гауссовский» шум, амплитуда которого нормирована на сумму амплитуд экспоненциальных составляющих спектра ($S_1 + S_2 + \dots + S_n$). Шум добавляется к полученному сигналу.

Эксперимент в режиме моделирования, так же как и в случае измерения с помощью релаксометра, повторяется несколько раз с накоплением, а данные моделирования могут быть сохранены и обработаны, так же как и данные ЯМР-эксперимента.

Разложение релаксационной кривой на составляющие времена релаксации

Для осуществления разложения кривой на составляющие релаксационные компоненты вводятся временные границы разложения (T_{\min} и T_{\max}). В настоящем варианте применяется линейный вариант решения на фиксированной сетке из 40 времен релаксации от T_{\min} до T_{\max} , и находятся амплитуды, соответствующие каждому из времен.

Решение осуществляется методом наименьших квадратов при условии неотрицательности переменных (Лоусон, Хенсон, 1986). При этом возможны два подхода. В первом случае находятся амплитуды при всех заданных временах релаксации (непрерывный спектр). Во втором случае определяется минимально необходимое число амплитуд, которые в сумме наилучшим образом удовлетворяют полученной в эксперименте релаксационной кривой (дискретный спектр).

Таким образом, в результате разложения экспериментальной кривой в спектр по временам релаксации мы получаем общее количество флюида (в случае керна это его пористость) и распределение флюида по степени связанности (что соответствует распределению пор по размерам).

Вся необходимая информация об изме-

рении и его интерпретации – сведения об образце, параметрах эксперимента, релаксационная кривая, дискретный и непрерывный варианты спектра времен релаксации, общая пористость, распределения спектра по степени связанности флюида, оценка проницаемости сохраняется в отчете.

Общая пористость определяется площадью под кривой разложения. В настоящее время применяется следующее деление кривой разложения по степени связанности (Coates at all., 2000).

На рис. 2 часть кривой, обозначенная А, соответствует глинисто-связанному флюиду. Часть Б – капиллярно связанный флюид, В – свободный (извлекаемый). Значение T_2 , которое отделяет связанный и подвижный (извлекаемый), флюид, называется временем отсечки. Для песчаников Мексиканского залива экспериментально установлено среднее значение $T_2=33$ мс. На самом деле, эта величина может меняться в пределах 10-40 мс (Аксельрод, 1998) и зависит от месторождения, конкретного пласта, и типа флюида, поэтому в программу ЯМР-релаксометра введена возможность корректировки этого пара-

метра в зависимости от литологии измеряемых пород и месторождения.

Отчет об измерении и архивирование результатов

Для представления результата измерения в удобном для восприятия виде предусмотрено создание двух видов отчетов об измерении: в формате html для просмотра с помощью любого Интернет-браузера, например, Internet Explorer, и в формате doc для просмотра с помощью Microsoft Word. Отчет в этом виде занимает одну страницу и удобен для распечатки. В отчетах сохраняется вся необходимая информация об измерении – сведения об образце, параметрах эксперимента, релаксационная кривая, ее интерпретация (дискретная и непрерывная), общая пористость, распределения спектра релаксации по диапазонам (степени связанности флюида), оценка проницаемости.

Результаты всех выполненных измерений сохраняются в архиве релаксационных кривых (рис. 6). В файле архива сохраняется информация о параметрах эксперимента и о релаксационной кривой. Интерпретация кривой не сохраняется, что позволяет

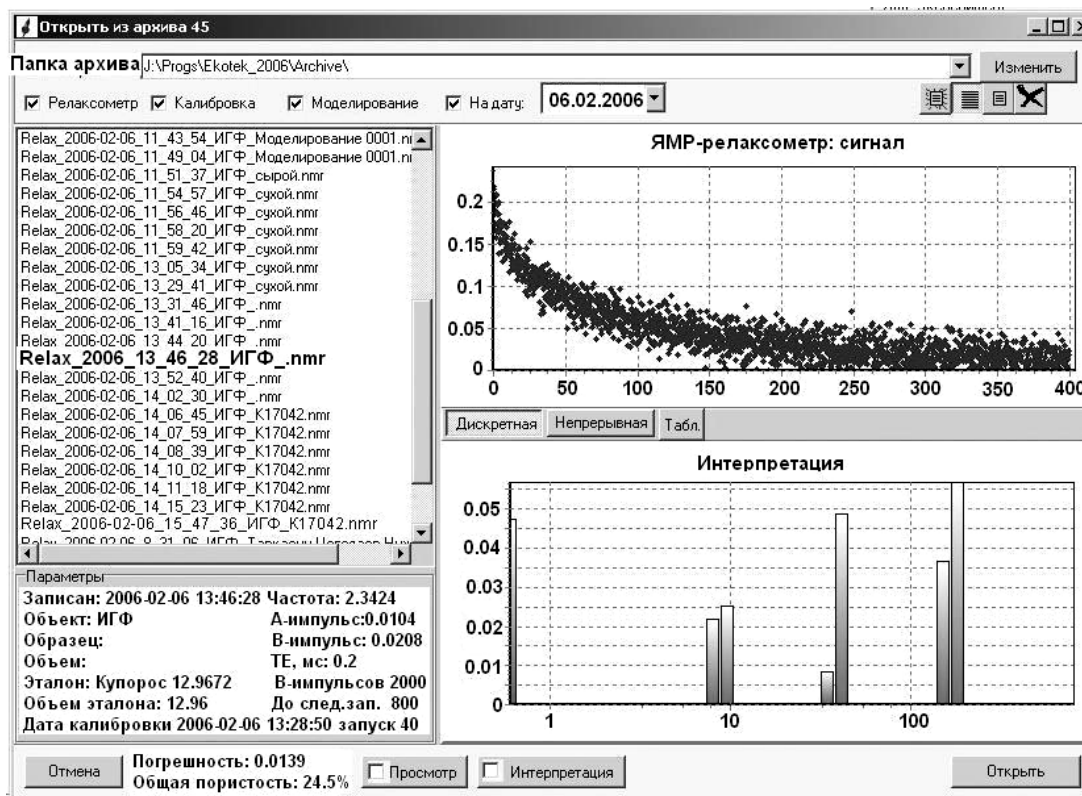


Рис. 6. Окно архива измерений

выполнить ее вновь с другими параметрами.

В списке архивных файлов пользователь может отобразить результаты измерения с помощью релаксометра, результаты калибровки или кривые, полученные моделированием. Также можно отобразить файлы только с определенной датой создания. Для выбранного файла отображается исходный сигнал, значения параметров, при которых он был получен, и интерпретация. Любой файл может быть открыт из архива и использован для нового варианта интерпретации.

Оценка проницаемости по результатам ЯМР-измерений

Для оценки проницаемости по результатам ЯМР-измерений в программе используются две модели. Для песчаников довольно хорошо работает модель Коатеса или индекса свободного флюида (Coates at all., 2000), согласно которой проницаемость пропорциональна пористости в четвертой степени и квадрату отношения количества свободного и связанного флюида. Кроме того применяются модели среднего времени Шлюмберже или SDR-модель (Coates, Xiao Lizhi and Prammer, 2000), где проницаемость также пропорциональна четвертой степени пористости и среднему геометрическому распределению T_2 . Коэффициенты пропорциональности для обеих моделей зависят от процессов, которые формировали пласт, типа породы, флюида и могут быть различными для каждой скважины. Они должны определяться из калибровки по керну для различных формирований и бассейнов.

Для практического использования как формулы Коатеса, так и модели среднего

времени, необходимо измерить проницаемость стандартным методом на наборе кернов близкого состава, затем на этих же кернах провести измерения методом ЯМР и определить параметры, входящие в формулы, в зависимости от литологии и петрофизики.

Заключение

Исследования керна и шлама при помощи современной ЯМР-аппаратуры как в лабораторных условиях, так и в процессе бурения позволяют более корректно проводить интерпретацию результатов ЯМР-каротажа. ЯМР и ЯМК дают дополнительную информацию о микроскопических свойствах среды для построения корректной модели месторождения и дальнейшей его эксплуатации.

Авторы выражают признательность к.ф.-м.н. Жакову С.В.

Литература

- Аксельрод С.М. Ядерно-магнитный каротаж в искусственном поле. Каротажник. 1998. Вып. 49. С. 46-63.
- Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач методом наименьших квадратов, М.: Наука, 1986. 232 с.
- Фаррар Т., Беккер Э. Импульсная и Фурье-спектроскопия ЯМР. М.: Мир, 1973. 165 с.
- Brown R.J.S., Chandler R., Jackson J.A., Kleinberg R.L., Miller M.N., Paltiel Z., Prammer M.G. History of NMR Well Logging. Concepts in Magnetic Resonance (Spatial Thematic Issue). 2001. V. 13. № 6. P. 335-416.
- Coates G.R., Xiao Lizhi and Prammer M.G. NMR Logging, Principles&applications. Hulliburton Energy Services Publishing.