

УДК 550.382.3

## ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНО-МАГНИТНОГО КАРОТАЖА В СИЛЬНОМ ПОЛЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН В УСЛОВИЯХ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА

**И. С. ШЕПЕЛЕВА**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** проницаемость, ядерно-магнитный резонанс, релаксация, каротаж, скважина, прецессия, флюид, коллектор.

### **Введение**

Промышленные скопления нефти Беларуси, обнаруженные в Припятской впадине, приурочены к межсолевым и подсолевым карбонатным и терригенным отложениям девонского возраста. В межсолевых и подсолевых карбонатных отложениях, нефтепродуктивными являются в основном доломиты и известняки, как правило, не чистые, а с включениями ангидритов, кварца и других минералов, возможно тонко переслаиваемые, – все они характеризуются сложно построенной структурой порового пространства, также встречаются прослойки сильно глинистых пород-неколлекторов, мергелей и ангидритов. Вышеперечисленные особенности входят в список проблем, осложняющих разработку месторождения, выработку запасов и поддержание добычи на достигнутом уровне.

В последнее время стало очевидным, что поддержание добычи нефти в Республике Беларусь на достигнутом уровне затруднительно. Очевидна необходимость углубленного изучения пород-коллекторов и освоения коллекторов сложного строения, определения их фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС), так как большинство месторождений нефти Припятского прогиба приурочены именно к таким коллекторам и находятся на завершающей стадии разработки.

Промысловая геофизика и методы оценки коллекторов были заметно усовершенствованы при определении пористости и насыщения флюидами, но не в области систематического определения проницаемости. Именно эта проблема и вызвала интерес, который нефтяная промышленность проявляет к ядерно-магнитному резонансу (ЯМР). Уникальная возможность метода для изучения горных пород в условиях Припятского прогиба связана с его богатой петрофизической основой, позволяющей получать информацию трех видов: о количестве флюидов в породе (пористость и ее компоненты); о свойствах этих флюидов (на основе коэффициента диффузии); о размерах пор, содержащих эти флюиды (определяют широкий комплекс свойств пород, в который входят проницаемость и электропроводность) [1].

Характеристика пласта-коллектора по проницаемости именно в пластовых условиях играет немаловажную роль для подсчета запасов нефти и газа, проектирования, анализа, регулирования разработки залежей и эксплуатации скважин.

Целью работы является опробование прибора ядерно-магнитно-томографического каротажа (ЯМТК) и метода ядерно-магнитного каротажа (ЯМК) в условиях Припятского прогиба и анализ достоверности полученных результатов проведенных исследований.

### Основная часть

Метод ЯМК основан на явлении ЯМР, которое, в свою очередь, основано на измерении сигнала свободной прецессии – реакции ядер водорода порового флюида на действие магнитных полей.

Зона исследования ЯМК (рис. 1) отличается от других стандартных видов каротажа. Она представляет собой цилиндрическую поверхность толщиной 0,5–1 мм, удаленную от стенки скважины примерно на 5–8 см [2], [3].

В разных по глубине точках затухание намагниченности регистрируется в виде релаксационной кривой (рис. 2). Начальная амплитуда релаксационной кривой, отражающая число резонирующих ядер, пропорциональна объемному водородосодержанию. При этом к моменту начала измерения релаксация ядер водорода, входящих в состав твердой фазы породы, уже завершается и они не вносят вклад в сигнал. Поэтому ЯМК характеризует водородосодержание только флюида (фильтрата, воды, нефти, газа) в пустотном пространстве породы, которое по данным калибровки пересчитывается в коэффициент пористости по ЯМК. Поэтому измеряемая величина полной пористости по ЯМК в общем случае не зависит от литологии пород.

Следующей отличительной чертой ЯМК в сильном поле является чувствительность к структуре порового пространства, которая определяет его основные прикладные применения.

Спектр ЯМР качественно характеризует распределение пористости по размерам пор (рис. 3). Стрелками показано условное положение пор разных размеров в спектре.

Компоненты общей пористости оцениваются путем интегрирования спектра в заданных интервалах времени, соответствующих различным механизмам удержания воды в порах разных размеров. Пористость капиллярно-связанной воды и пористость глин вместе составляют емкость, заполненную остаточной водой [5].

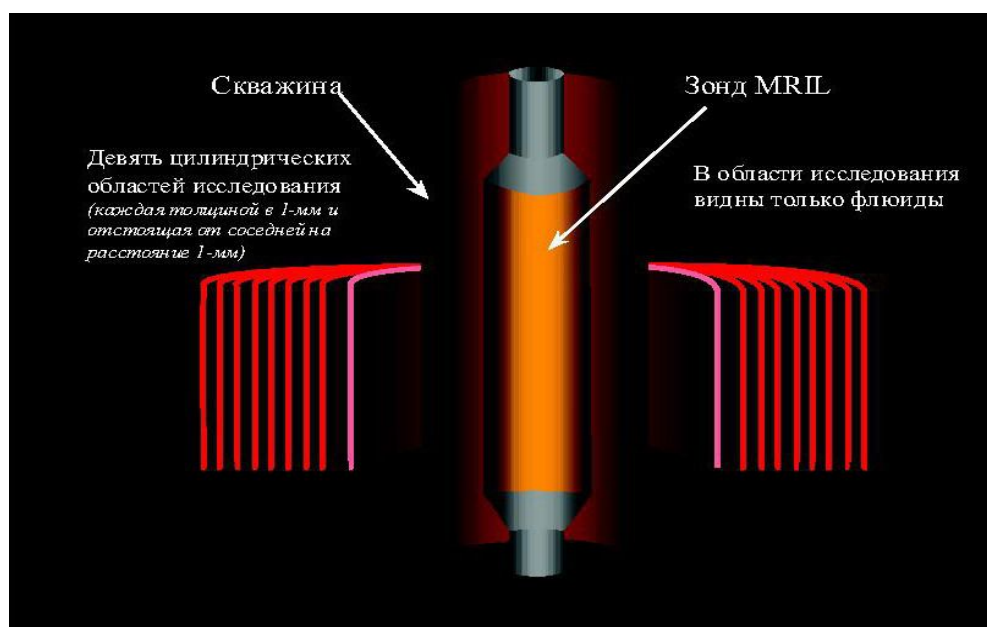


Рис. 1. Зона исследования ЯМК

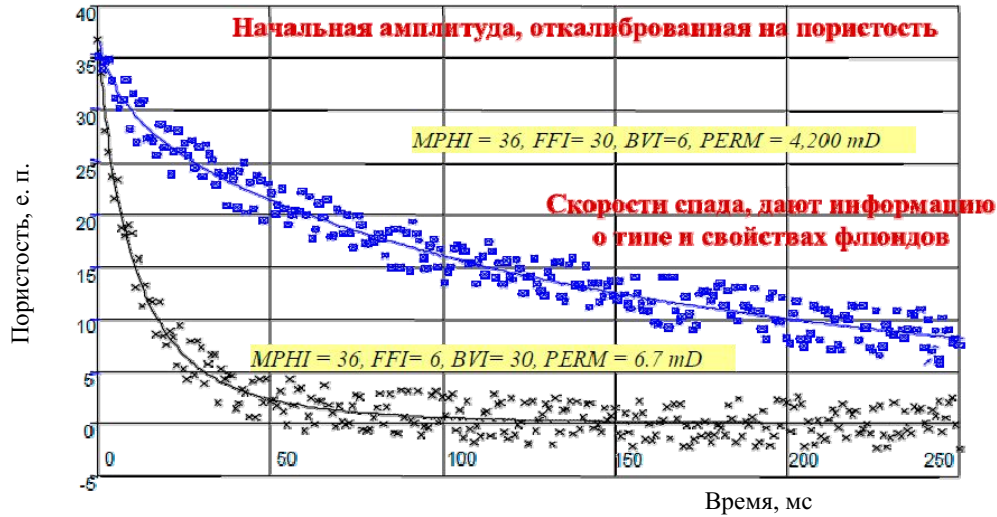


Рис. 2. Релаксационная кривая ядер водорода, регистрируемая прибором ЯМК

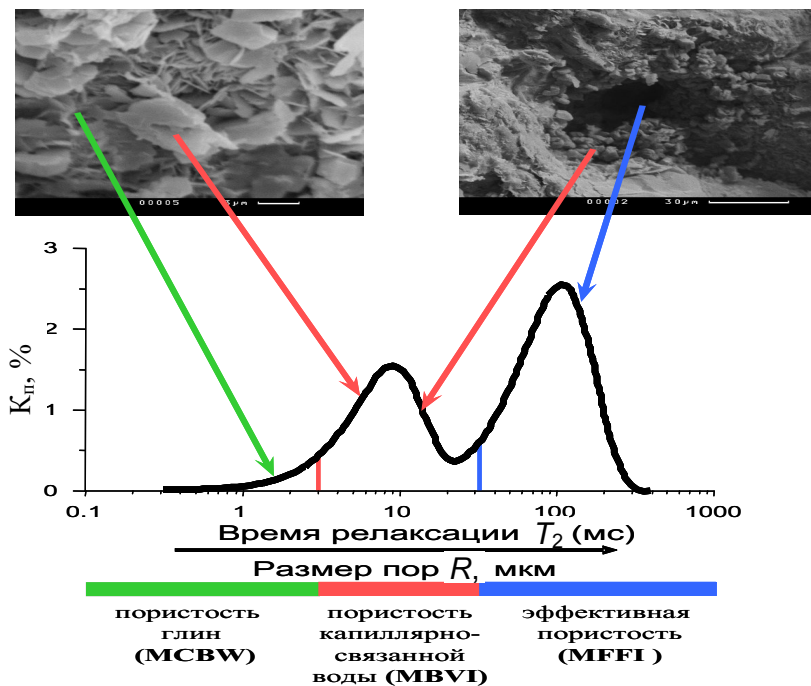


Рис. 3. Спектр ЯМК, характеризующий распределение пористости по размерам пор

Предыдущее поколение аппаратуры ЯМК – К-9 – имеет следующие характеристики: радиус исследования около 1 см, работает в гравитационном поле Земли, что является основным ограничением возможности при исследовании пород с небольшими временами релаксации (время успокоения вращения протона после прецессии), из-за чего практически сложно получить качественные результаты при наличии в буровом растворе добавок нефти. Небольшое время релаксации имеет микропористая порода, связанная с глинами и некоторыми другими минералами, содержащими воду, которые по данным ЯМР обладают очень быстрым временем поперечной релаксации.

Именно такие породы входят в литологический состав Припятского прогиба, и оценка водородосодержания флюидов в пустотном пространстве таких пород определяла необходимость проведения исследований методом ЯМК с использованием соответствующего прибора ЯМТК на нефтяных месторождениях Беларуси.

Поэтому с целью определения информативности метода ЯМК и надежности получаемых результатов в трех скважинах Припятского прогиба совместно с детальным комплексом геофизического исследования скважин (ГИС), специалистами ООО «Нефтегазгеофизика» (РФ, г. Тверь) в 2017 г. были проведены опытно-промышленные исследования прибором ЯМТК в сильном искусственно созданном магнитном поле, наведенном на изучаемый объект в геологическом разрезе скважины.

В таблице представлены данные об условиях проведения работ.

Условия проведения исследований скважин методом ЯМК

Месторождение	Номер скважины	Отложения	Интервал		Дата проведения каротажа	Диаметр скважины, мм	Угол наклона скважины, град.	Плотность промысловой жидкости, кг/м <sup>3</sup>	Температура в скважине, °С	Тип промысловой жидкости
			Кровля, м	Подолва, м						
0001	1	межсолевые	1970	2200	02.05.2017	165,1	26–32	1,12	75	ОМС
0002	2	межсолевые	2350	2490	25.05.2017	165,1	13–14	0,95	85	БРПП
0003	3	подсолевые	2500	2670	24.06.2017	152,4	10–13	1,06	88	ОМС

Исследования ЯМК с использованием прибора ЯМТК выполнялись по схеме «снизу–вверх» со скоростью 90–130 м/ч.

В процессе проведения исследований подлежали решению следующие задачи:

1. Определение емкости пород, флюидальная модель емкостного пространства:

- Коэффициент общей пористости по ЯМК – отношение объема пор к объему породы.

- Коэффициент эффективной пористости по ЯМК – отношение объема крупных пор (занятых потенциально способным к движению флюидом) к объему породы. В состав эффективной пористости входит и каверновая пористость.

- Коэффициент пористости капиллярно-связанного флюида – отношение суммарного объема пор, заполненных капиллярно-связанным флюидом, к объему породы.

- Коэффициент микропористости глин – отношение объема микропор к объему породы. В основном характеризует пористость, формируемую тонкодисперсной пеллитовой фракцией (гидрослюда, смектиты).

2. Определение структуры емкостного пространства:

- Распределение пор по размерам.

- Раздельная количественная оценка каверновой и поровой составляющих.

3. Определение остаточного флюидонасыщения:

Коэффициент остаточной водонасыщенности – отношение объема пор, заполненных остаточной водой (капиллярно-связанной и водой глин), к объему пор породы.

Индекс остаточной нефтенасыщенности средних по вязкости фракций углеводорода – прогнозная доля пористости, соответствующая остаточной нефти средней вязкости в эффективных порах и др.

Интерпретация полученных результатов исследований проводилась сотрудниками «БелНИПИнефть», в том числе при непосредственном участии автора.

Результаты интерпретации результатов исследований ЯМК в сильном магнитном поле на примере скважины Речицкого нефтяного месторождения Припятского прогиба представлены на рис. 4.

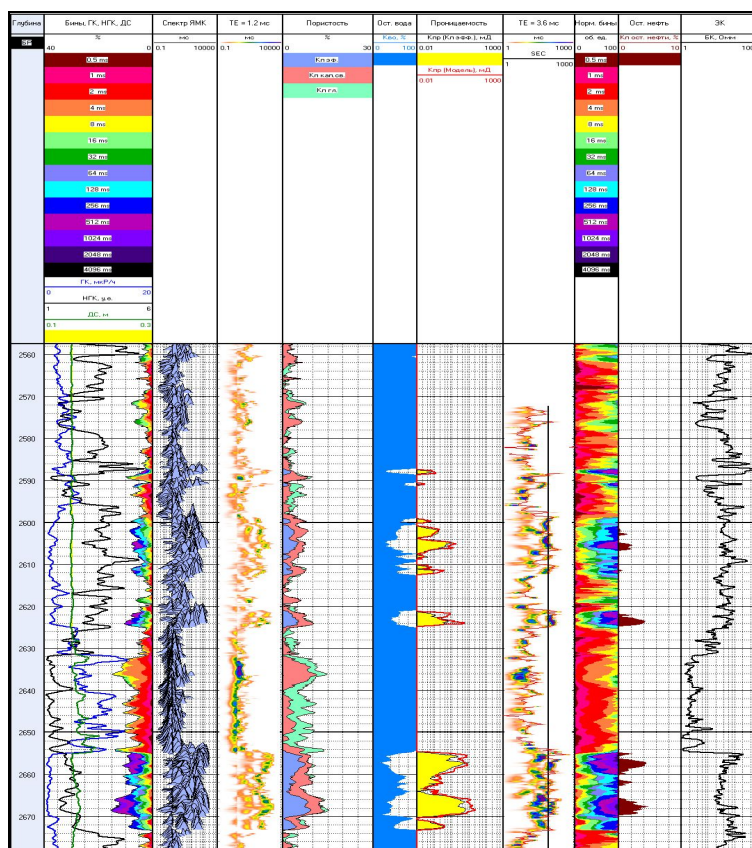


Рис. 4. Результаты интерпретации результатов исследований ЯМК в сильном магнитном поле на примере скважины Речицкого нефтяного месторождения Припятского прогиба

Качество данных, полученных методом ЯМК, выше в скважинах с использованием бурового раствора на нефтяной основе (РНО), чем раствора на водной основе (РВО). Проводимость РНО значительно ниже, что снижает эффекты нагрузки на систему «передатчик–приемник». Это снижение позволяет записать больше эхосигналов и с меньшим уровнем шумовых помех.

Если у системы РВО повышенная проводимость (т. е. сопротивление слишком низкое), то нагрузка возрастает, накладывая существенные ограничения на выполнение работ скважинным прибором. Эта величина может возрасти до такой степени, что возможно снижение качества регистрации данных прибором [4].

Для работы в более проводящих средах, в зависимости от диаметра скважины, может применяться специальный чехол (флюидный экран), изолирующий часть воды от антенны.

Запись ЯМР сигнала в скважине с РНО не ограничена проблемами с проводимостью, фильтрат раствора в поровом пространстве дает дополнительный углеводородный сигнал, который может существенно затруднять интерпретацию данных каротажа.

Большинство флюидов РНО обладает длинными временами релаксации  $T_1$ , а их диффузия сравнима с диффузией воды. Эти обстоятельства затрудняют их разделение с помощью методов сдвига или разности спектров по другим методикам проведения ГИС.

### Заключение

Исходя из полученных результатов, применительно к условиям Припятского прогиба, метод ЯМК с использованием прибора ЯМТК усовершенствованной модификации, позволяет определить следующие параметры:

– величины полной и эффективной пористости, которые необходимы для оценки начальных запасов, их определение методом ЯМК не зависит от литологии (в отличие от пористости по акустическому, плотностному или нейтронному каротажу). Следовательно этот метод можно использовать в слабоизученных разрезах со сложным составом пород. В коллекторах с аномальной радиоактивностью ЯМК проявил себя эффективнее в определении полной и эффективной пористости по сравнению с комплексом стандартных методов (АК, ННКт, ГПП, СГК);

– объемное содержание связанной воды и свободных флюидов (флюидальная модель породы);

– распределение пор по размерам и количественная оценка поровой и каверновой составляющих емкостного пространства отдельно;

– коэффициент проницаемости по сеточной капиллярной модели на основе оценок распределения пористости по размерам пор.

Таким образом, полученные результаты проведенных исследований свидетельствуют о надежности примененного метода ЯМК с использованием прибора ЯМТК, перспективности направления исследований, необходимости расширения объемов применения этого метода с использованием прибора ЯМТК в качестве исследовательского инструмента.

На сегодняшний день примененный метод (ЯМК + ЯМТК), в отличие от других направлений такого метода с использованием приборов предыдущего поколения (ЯМК К-9), является одним из наиболее высокотехнологичных и информативных методов ГИС для оценки фильтрационно-емкостных свойств пород, а также определения свойств и объемного содержания вмещающих флюидов.

### Литература

1. Аксельрод, С. М. Ядерный магнитный резонанс в нефтегазовой геологии и геофизике / С. М. Аксельрод, В. Д. Неретин. – М. : Недра, 1990. – 192 с.
2. Аксельрод, С. М. Петрофизическое обоснование ЯМК в поле постоянных магнитов. Методология и результаты лабораторных исследований ЯМР-свойств пород (по публикациям в американской геофизической печати) / С. М. Аксельрод // Каротажник. – 1999. – № 59. – С. 28–47.
3. Новые возможности ядерно-магнитного каротажа / Р. Аккурт [и др.] // Нефтегазовое обозрение. – 2008. – Т. 20, № 4. – С. 4–27.
4. Дубровский, В. С. Новые возможности ядерно-магнитного каротажа в условиях применения облегченных типов промывочной жидкости / В. С. Дубровский, В. Д. Чухвичев, В. М. Мурзакаев // Каротажник. – 2010. – Вып. 8. – С. 185–187.
5. Первый российский прибор ядерно-магнитного каротажа с использованием поля постоянных магнитов / Е. М. Митюшин [и др.] // Геофизика. – 2002. – № 1. – С. 43–50.

*Получено 27.08.2018 г.*