

Неразрушающий, оперативный экспресс-анализ полноразмерного керна на основе данных ядерного магнитного резонанса

■ Воронов К.А.^{1,2}, Григорьев Р.В.², Воронова Л.А.¹, Абдуллин Р.Н.¹, Гарипова Л.А.¹, Жилин С.А.³

¹ Научно-техническое управление ООО «ТНГ-Групп»,

² К(П)ФУ, Институт геологии и нефтегазовых технологий,

³ Институт "ТатНИПИнефть" ПАО "ТАТНЕФТЬ" им. В.Д. Шашина.

Аннотация. В работе рассмотрены возможности применения метода ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) для неразрушающего исследования керна на примере месторождения Западной Сибири. Представлена методика оперативного определения объемов подвижного и связанного флюидов, структуры и объема порового пространства и качественной оценки распределения пор по размерам в режиме реального времени без разрушения керна и его предварительной подготовки.

Ключевые слова: ЯМР-Керн, полноразмерный керн, неразрушающий анализ, фильтрационно-емкостные свойства, релаксационные кривые, 2D-карты T_1/T_2 , сравнительный анализ.

Введение

Современные задачи изучения коллекторских свойств горных пород требуют разработки экспресс-методов, позволяющих получать достоверную информацию о структуре порового пространства без длительной подготовки образцов. Традиционные методы исследования керна часто связаны с разрушением образцов и требуют значительных временных затрат. Метод ядерно-магнитного резонанса предлагает принципиально новый подход к решению этих задач, позволяя проводить неразрушающий анализ керна в режиме реального времени [3].

Методика эксперимента

Исследования проводились на мобильной установке «ЯМР-Керн» (рис. 1). Она сочетает преимущества лабораторных и скважинных методов: неразрушающий анализ, детализацию до 1 см и возможность работы в полевых условиях [2].

Выполняемые задачи:

- определение общей, эффективной, капиллярно-связанной и глинисто-связанной пористостей полноразмерно-



▲ Рис. 1. Установка ЯМР-Керн.

го керна на скважине и в лаборатории [5];
- анализ влияния изогеля на показания установки ЯМР-Керн.

В 2024 году установка получила сертификат об утверждении типа средств измерений (№ 92664-24) и внесена в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений, что подтверждает её соответствие метрологическим стандартам.

Метод основан на измерении времени спин-спиновой релаксации T_2 , кото-

рое коррелирует с размерами пор. Не требуется предварительная подготовка образцов - высушивание и пропитка, что исключает возможность изменения исходной структуры порового пространства [1].

Исследования проводились с использованием двухрежимного протокола измерений: непрерывного определения пористости и регистрации 2D карт в репрезентативных точках керна. Отбор точек для детального анализа осуществлялся на основе данных ЯМР-измерений и стандартного комплекса ГИС.

Для анализа использовались образцы полноразмерного керна продуктивных пластов месторождения Западной Сибири.

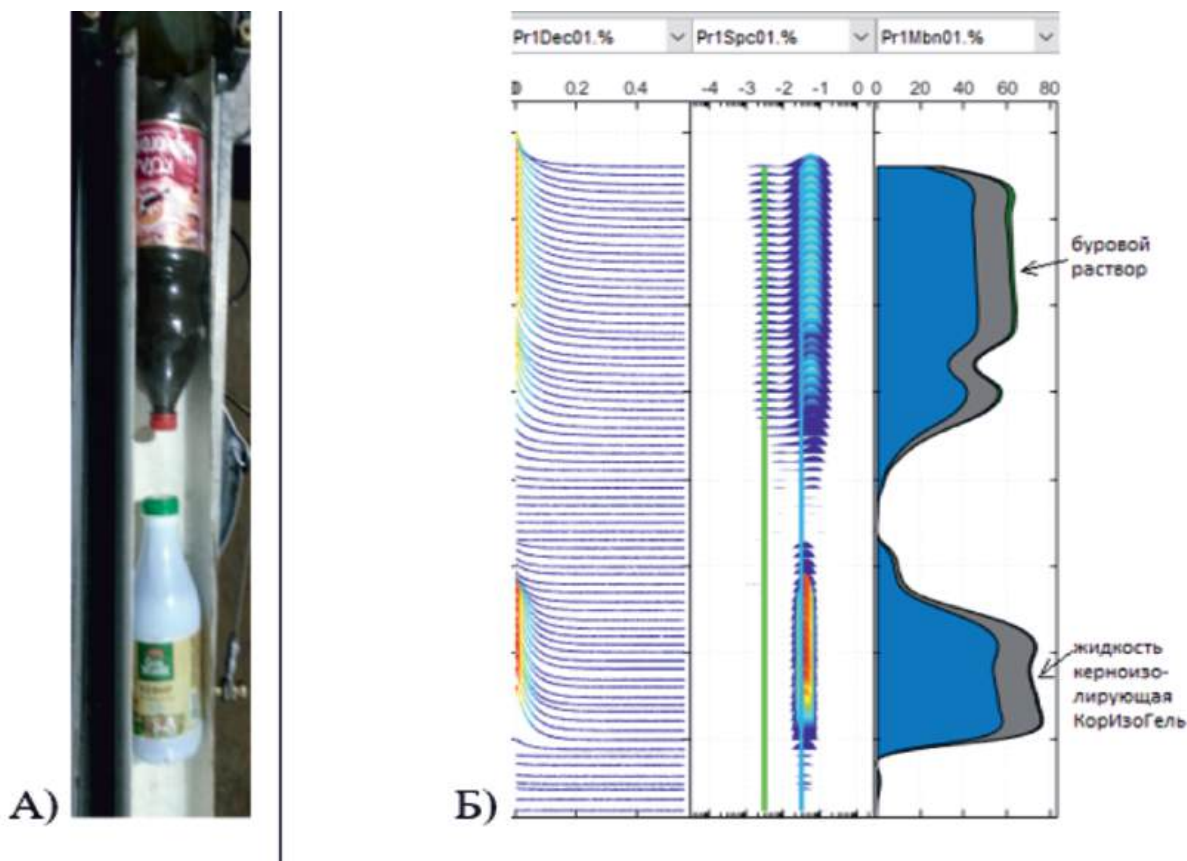
Методика и результаты обработки и интерпретации данных непрерывных замеров полноразмерного керна

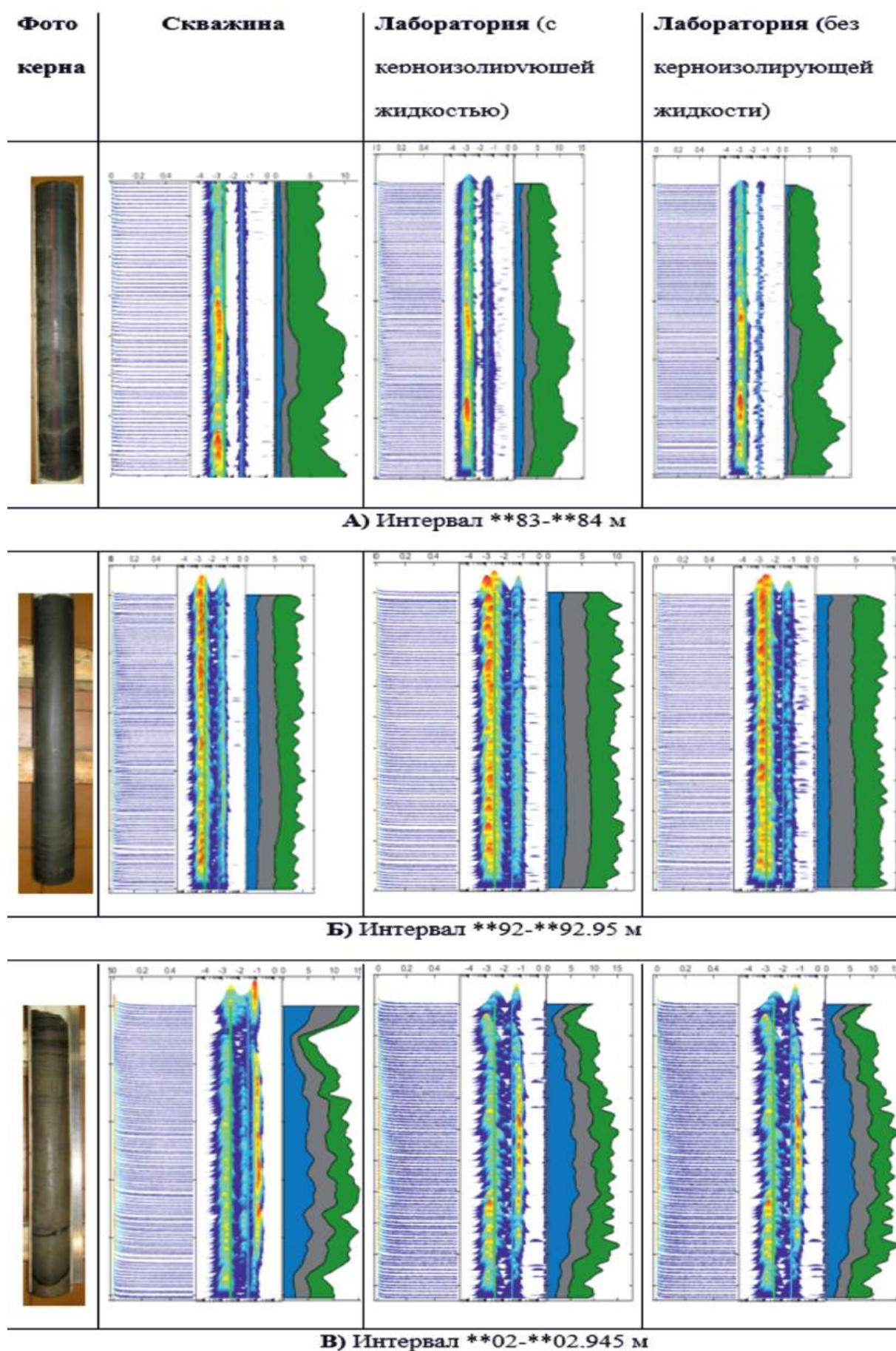
Бурение проводилось на растворе на углеводородной основе, при опережающем проникновении это может негативно сказаться на результатах ЯМР.

Для изоляции керна в процессе его отбора, транспортировки и хранения применялась керноизолирующая жидкость КорИзоГель (плотность 1.03-1.5 г/см³), которая представляет собой гелеобразную неинвазивную однородную жидкость на неуглеводородной основе.

Для оценки ФЕС бурового раствора, он был измерен с помощью установки ЯМР-керна (рис. 2 А). Кп эфф порядка 40% при

▼ Рис.2. ЯМР-исследования бурового раствора и изолирующей жидкости.
Слева (А) – исследуемый объект (бутылки с раствором и изогелем)
Справа (Б):
трек 1 – спад релаксационной кривой T_2 ,
трек 2 – преобразованный спектр T_2 ,
трек 3: синяя заливка – Кпэфф, серая – капиллярно-связанная пористость,
зеленая - общая пористость





▲ Рис. 3. Сравнение замеров керна установкой «ЯМР-Керн».

общей пористости 60%. Также данному исследованию подверглась керноизолирующая жидкость в пластиковой бутылке «КорИзоГель» (рис. 2 А), согласно которому мы видим, что подвижность геля - высокая. Кпэфф (синяя заливка на треке 3) порядка 60% при общей пористости около 80%. Коэффициенты диффузии близки к обычной воде. Вязкое состояние обеспечивается структурой макромолекул. Времена релаксации воды близки к свободной.

В результате проведения стандартной обработки данных спектра T2 с принятой отсечкой эффективной пористости для песчаных пород 33мс, были получены следующие данные: индекс проницаемости КпрЯМК (MCS, MLM); общая (Кпобщ_МС), эффективная (Кпэфф_МФ), связанная (Кпсвяз_МРФ) пористости; спектр распределения T2 от 0 до 3000 мс, (рис. 2 Б) [4]. В общем спектре наблюдаются два амплитудных пика (рис. 2 Б, трек 2). Правая пика более выражена и соответствует коротким временам порядка 3мс. Вторая пика находится левее отсечки 33 мс и соответствует подвижному флюиду.

Сформированный профиль распределения пористости по данным ЯМР-исследований для различных глубин показал, что общая пористость не превышает 10% (максимум 13% в интервале **97,8-**99 м). На всех образцах присутствует фоновая эффективная пористость 1,5-2%, что, скорее всего, является результатом влияния геля.

Замеры проводились дважды, с разницей в 15 дней. Сначала на скважине, сразу после отбора, а затем в лаборатории. Отдельные образцы очищались от изогеля и были измерены повторно (рис. 3 А, Б, В).

Направление керна сверху вниз соответствует увеличению по глубине.

Сопоставление параметров ФЕС образцов керна, измеренных на скважине и в лаборатории

При сравнении замеров, полученных на скважине и в лаборатории, было выявлено, что значения пористости (общая, эффективная), полученные на образцах изолированного керна, в основном коррелируются (рис. 3 А, Б, В), отличаясь в отдельных низко пористых интервалах не более чем на 2% (на уровне погрешности).

Сравнение значений Кпобщ, Кпэфф, Кпр, Ков очищенных образцов и образцов керна с гелем для разных глубин, измеренных в лаборатории приведены в таблице 1.

По результатам сопоставления полученных данных наблюдается следующая тенденция: ФЕС очищенных образцов керна меньше значений ФЕС образцов с гелем.

Построены кросс-плоты для параметров ФЕС (Кпэфф, Кпобщ, Кпр) образцов керна с изогелем и образцов, очищенных от изогеля (рис. 4, 5, 6).

Выведены уравнения линейной регрессии для Кпэфф (рис. 4), Кпобщ (рис.5), Кпр Коат (рис. 6):

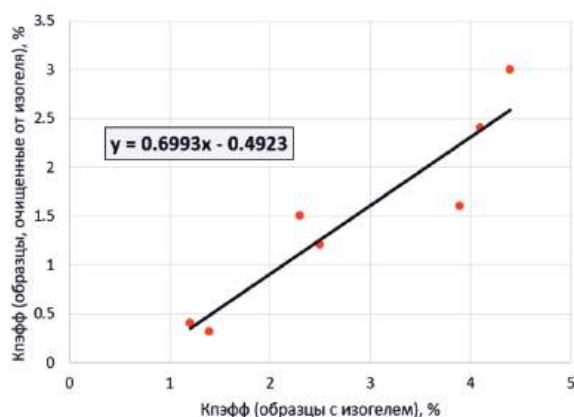
Кп эфф: $y = 0.6993x - 0.4923$, где x – Кп эфф образцов с изогелем, y – Кп эфф образцов, очищенных от изогеля;

Кп общ: $y = 0.3244x + 4.6467$, где x – Кп общ образцов с изогелем, y – Кп общ образцов, очищенных от изогеля;

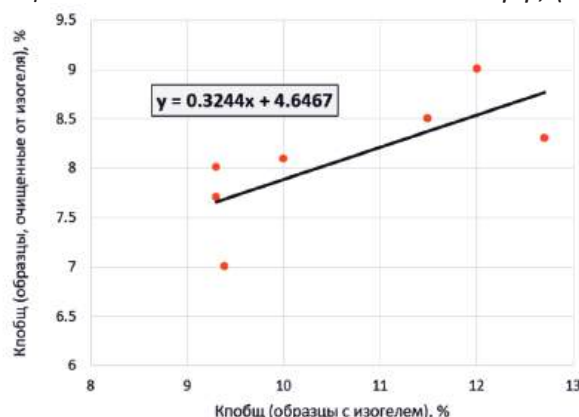
Кпр Коат $y = 0.1761x + 0.0149$, где x – Кпр Коат образцов с изогелем, y – Кпр Коат образцов, очищенных от изогеля.

№	Глубина, м		Образцы керна, очищенные от геля					Образцы керна, изолированные гелем				
	Кро- вля	Подощ ва	Кпэфф, %	Кпобщ, %	Кпрлог, мД	КпрпоКоат, мД	Ков, %	Кпэфф, %	Кпобщ, %	Кпрлог, мД	КпрКоат, мД	Ков, %
			MF11	MS11	MLM	MCS	SIRR	MF11	MS11	MLM	MCS	SIRR
1	**83	**84	0,3	8,0	0,001	0,001	95,5	1,4	9,3	0,003	0,018	84,7
2	**87	**87,9	0,4	7,7	0,005	0,005	94,9	1,2	9,3	0,002	0,009	86,9
3	**92	**92,9	1,5	8,1	0,005	0,013	80,8	2,3	10,0	0,013	0,047	77,1
4	**97	**97,9	2,4	8,5	0,014	0,041	71,9	4,1	11,5	0,073	0,271	63,3
5	**02	**02,9	3	9,0	0,027	0,123	67,6	4,4	12,0	0,118	0,480	64,6
6	**07	**07,9	1,2	7,0	0,002	0,113	84,2	2,5	9,4	0,018	0,087	74,9
7	**12	**12,9	1,6	8,3	0,005	0,014	80,2	3,9	12,7	0,055	0,256	69,1

▲ Табл. 1. Сопоставление параметров ФЕС образцов керна, измеренных в лаборатории.



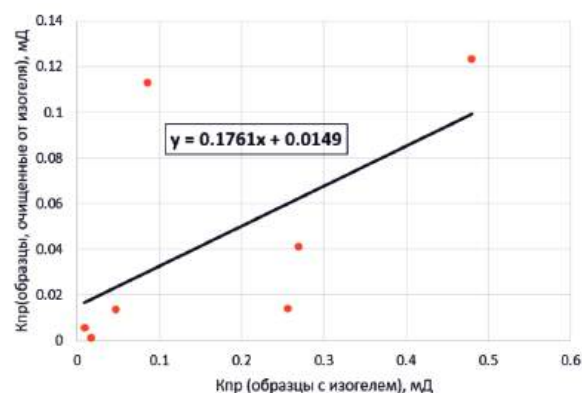
▲ Рис. 4. Влияние КорИзоГеля на фильтрационно-емкостные свойства: Кпэфф, (%).



▲ Рис. 5. Влияние КорИзоГеля на фильтрационно-емкостные свойства: Кпобщ, (%).

Выводы

Проведенные исследования подтверждают возможность применения метода ЯМР для оперативной оценки фильтрационно-емкостных свойств горных пород. Метод позволяет получать информацию о распределении пор по размерам и разделении флюидов на подвижную и связанную фазы. Также данная



▲ Рис. 6. Влияние КорИзоГеля на фильтрационно-емкостные свойства: Кпр, (мД).

методика не требует предварительной подготовки образцов и обеспечивает высокую скорость измерений (5-7 минут на образец).

Сопоставление данных, полученных на скважине и в лабораторных условиях, показало хорошую сходимость результатов с отклонением не более 2% (Кпэфф, Кпобщ) для большинства образцов, что свидетельствует о надежности методики полевых измерений.

Установлено, что применение изолирующего геля КорИзоГель приводит к систематическому завышению значений пористости на 1,5-2%, что необходимо учитывать при интерпретации данных. Полученные уравнения регрессии в данной работе позволяют корректно пересчитывать параметры ФЕС, измеренные на образцах с изогелем КорИзоГель, в значения, соответствующие очищен-

ным образцам:

Для эффективной пористости: $y = 0,6993x - 0,4923$;

Для общей пористости: $y = 0,3244x + 4,6467$;

Для проницаемости: $y = 0,1761x + 0,0149$.

Следует отметить, что для повышения надежности построенных регрессионных моделей необходимо расширение статистической базы исследований.

Таким образом, метод ЯМР демонстрирует значительный потенциал для оперативной оценки коллекторских свойств пород непосредственно на буровой площадке до проведения каротажа в режиме реального времени, обеспечивая получение достоверных данных в минимальные сроки.

Дальнейшее развитие метода предполагает создание корреляционных зависимостей для различных типов коллекторов и оптимизацию методик интерпретации данных. Это позволит расширить область применения ЯМР-исследований и повысить их надежность для решения геологических задач.

Литература

1. Коутс Г.Р., Сяо Л., Праммер М.Г. ЯМР: принципы и применение. Хьюстон: Халлибертон Энерджи Сервисез. 1999. 253 с.
2. Мурзакаев В.М., Тараканов В.К., Афонин В.В., Дубровский В.С. Пат. RU 2457516 С1. Устройство ядерно-магнитного резонанса в поле Земли для исследования полноразмерных кернов. № 2011110387/28; Заявл. 18.03.2011; Опубл. 27.07.2012. Бюл. № 21.
3. Нургалиев Д.К., Косарев В.Е., Мурзакаев В.М. Аппаратура ядерного магнитного резонанса для исследования полноразмерных кернов в лабораторных и полевых условиях // Георесурсы. – 2012. – № 4(46). – С. 16-18.
4. Таужнянский Г.В., Рудакова О.Ю., Тимофеева О.А., Малинин А.В. Применение данных ядерно-магнитного каротажа при петрофизическом обосновании количественных критериев выделения терригенных коллекторов месторождений Западной Сибири // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, 2013. № 9. С. 42-44.
5. Шумскайте М.Й., Глинских В.Н., Голиков Н.А. Определение петрофизических параметров терригенных пород-коллекторов методом ядерно-магнитной релаксометрии (аналитический обзор) // НТВ «Каротажник». 2018. Вып. 12 (294). – УДК 550.8.055