

Уточнение граничного значения T2CutOff для повышения достоверности выделения коллекторов по данным ядерно-магнитного резонанса на примере Среднеботуобинского месторождения

- Воронов К.А., К(П)ФУ, Институт геологии и нефтегазовых технологий, г. Казань, Научно-техническое управление ООО «ТНГ-Групп», г. Бугульма
- Воронова Л.А., Абдуллин Р.Н., Научно-техническое управление ООО «ТНГ-Групп», г. Бугульма.

Аннотация: Исследование посвящено анализу влияния граничной отсечки T2CutOff на точность оценки фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) карбонатных коллекторов по результатам обработки данных ядерно-магнитного каротажа. На примере осинского горизонта Среднеботуобинского месторождения выполнено сравнение стандартной методики с фиксированным значением T2CutOff (100 мс) и нового подхода с переменным значением, рассчитываемым как функция от общей пористости.

Проведенный анализ показал, что классический метод приводит к завышению коэффициента остаточной водонасыщенности ($K_{ов}$) относительно эталонных данных, рассчитанных на основе керна. В то же время, использование параметра T2CutOff обеспечивает лучшую сходимость расчетных и керновых значений, что подтверждается повышением коэффициента детерминации с 0,3 до 0,67. Кроме того, расчетная подвижность флюида, полученная по новой методике, демонстрирует более точное соответствие прямым гидродинамическим замерам.

Результаты работы свидетельствуют о высокой эффективности предлагаемого алгоритма для повышения достоверности интерпретации ЯМК-данных и рекомендованы к применению на Среднеботуобинском месторождении.

Ключевые слова: ядерно-магнитный каротаж, отсечка T2CutOff, осинский горизонт, фильтрационно-емкостные свойства, карбонатные отложения.

Введение

Метод ядерно-магнитного каротажа (ЯМК) является уникальным в комплексе ГИС, позволяющим оценивать эффективную, общую и связанную пористости и получать дифференцированную информацию о распределении пор по размерам [1,2]. Одним из важных параметров при интерпретации данных ЯМК является граничное значение времени спин-спиновой релаксации T2CutOff, которое разделяет объем связанного (BFV) и свободного (FFV) флюидов [3]. От выбора граничного значения напрямую зависит оценка эффективной пористости и, как следствие, последующее выделение коллекторов [4].

В отраслевой практике широко применяются константные значения T2CutOff:

33 мс для терригенных и 100 мс для карбонатных пород. Однако многочисленные исследования показывают, что эти значения могут варьироваться в зависимости от литологии, типа глинистого материала и удельной поверхности пород конкретного месторождения [3,5]. "Золотым стандартом" определения T2CutOff являются лабораторные исследования керна на центрифуге, однако такие данные доступны не всегда [6,7].

Таким образом, актуальность работы обусловлена потребностью в повышении достоверности определения петрофизических характеристик пород-коллекторов по комплексу данных геофизических исследований скважин, а также поиска новых методов и подходов к изучению фильтрационно-емкостных

свойств продуктивных пластов.

Цель данной работы — применение алгоритма расчета переменного значения T2CutOff для учета изменчивости фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) по разрезу и определения оптимальных диапазонов T2CutOff осинского горизонта.

Задачи исследования:

- провести обработку с принятой отраслевой отсечкой T2CutOff;
- провести обработку с переменной T2CutOff;
- сравнить коэффициент остаточной водонасыщенности при различных обработках с коэффициентом остаточной водонасыщенности керна;
- рассчитать и сравнить подвижности по ЯМК и ГДК.

Стандартная обработка ЯМК

В основу исследования легли данные ЯМК по скважинам 1, 2, 3 Среднеботу-

бинского месторождения. В обработку были включены спектры времен релаксации T2 [8]. В качестве эталонных данных использован коэффициент остаточной водонасыщенности (Ков_кern), рассчитанный по зависимости Ков от Кп из подсчета запасов:

$$K_{ov_кern} = \frac{0,01545}{(MRP)^{1,058}}, \quad (1)$$

где MRP – коэффициент общей пористости по ЯМК.

Коэффициент остаточной водонасыщенности (Ков) по ЯМК рассчитывался по формуле:

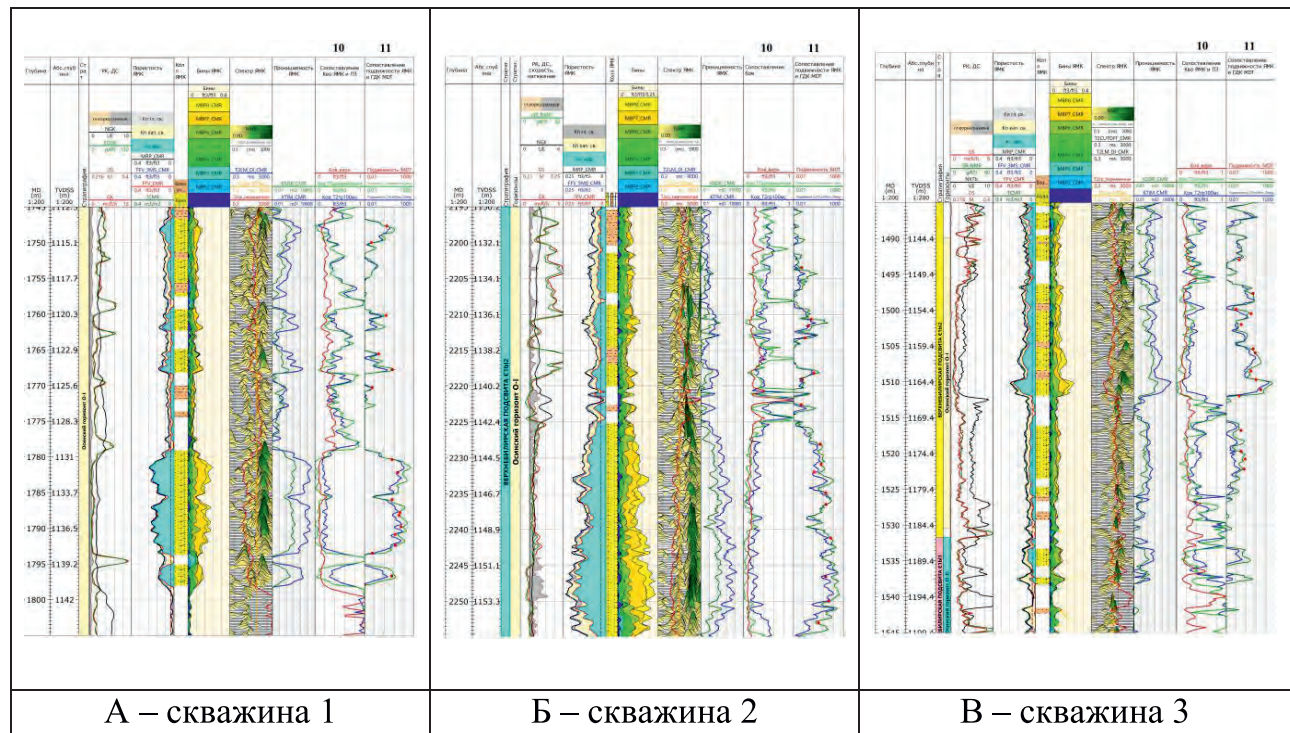
$$K_{ov} = \frac{BFV}{MRP}, \quad (2)$$

где BFV – коэффициент связанной воды.

На первом этапе обработка данных проводилась с применением принятого отраслевого значения отсечки T2CutOff, являющегося отраслевым стандартом:

▼ Рис. 1. Планшеты результатов обработки ЯМК по трем скважинам

Трек 10: красная кривая – эталонный Ков по керну, синяя кривая – Ков, рассчитанный с T2CutOff = 100 мс, зеленая кривая – Ков, рассчитанный с переменной T2CutOff; Трек 11: красные точки – прямые замеры подвижности по MDT, синяя кривая – подвижность, рассчитанная с T2CutOff = 100 мс, зеленая кривая – подвижность, рассчитанная с переменной T2CutOff.



100 мс для карбонатных отложений (осинский горизонт) и 33 мс для терригенных отложений. Данная отсечка применяется для разделения связанной воды (BFV) и свободного флюида (FFV).

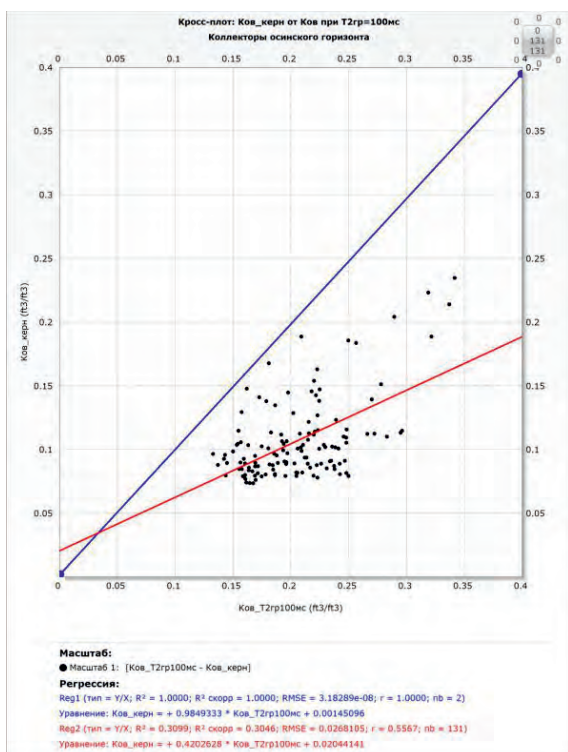
В результате стандартной обработки данных ЯМР для скважин 1, 2, 3 (рис. 1А, 1Б, 1В) были рассчитаны следующие петрофизические параметры: общая пористость (MRP_CMР), пористость связанной воды (BFV_CMР), эффективная пористость (FFV_CMР), проницаемость по моделям Коатса-Тимура (КТИМ_CMР) и SDR (KSDR_CMР) [5,8], биновая пористость (MBP1-MBP8) — распределение пор по размерам, коэффициент остаточной водонасыщенности (SWI_CMР), вязкость (Visc), подвижность (Fluid_Mobility_CMР). На основании полученных данных были выделены коллекторы в интервале записи ЯМК для дальнейшего комбинированного анализа.

Методика расчета переменной отсечки T2 и сравнительный анализ результатов

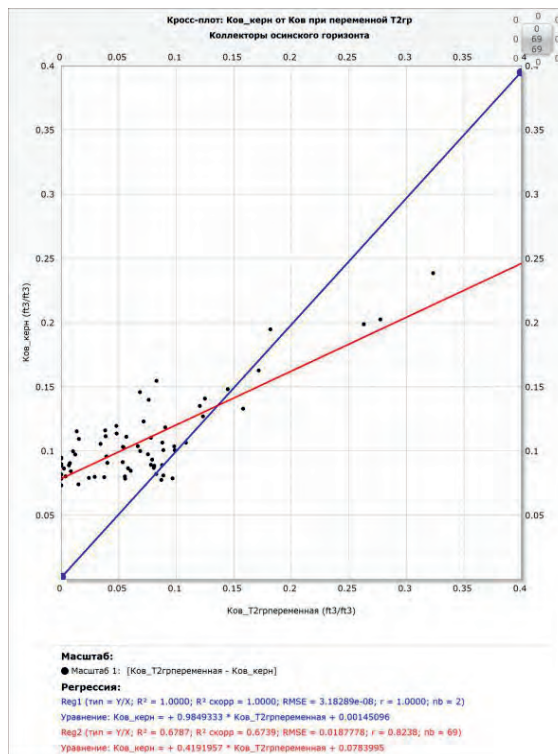
На следующем этапе была применена новая методика с использованием переменной отсечки T2CutOff. Переменное граничное значение T2 рассчитывается как функция от общей пористости (MRP), что позволяет адаптировать граничное значение к изменению фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) по разрезу. С использованием рассчитанной переменной отсечки была проведена повторная обработка данных, в ходе которой также были выделены коллекторы и посчитаны ФЕС (FFV, BFV, SWI, КТИМ, KSDR и др.).

Для оценки эффективности методик обработки ЯМК были построены кросс-плоты и проведено сравнение коэффициента остаточной водонасыщенности (Ков), рассчитанного тремя способами

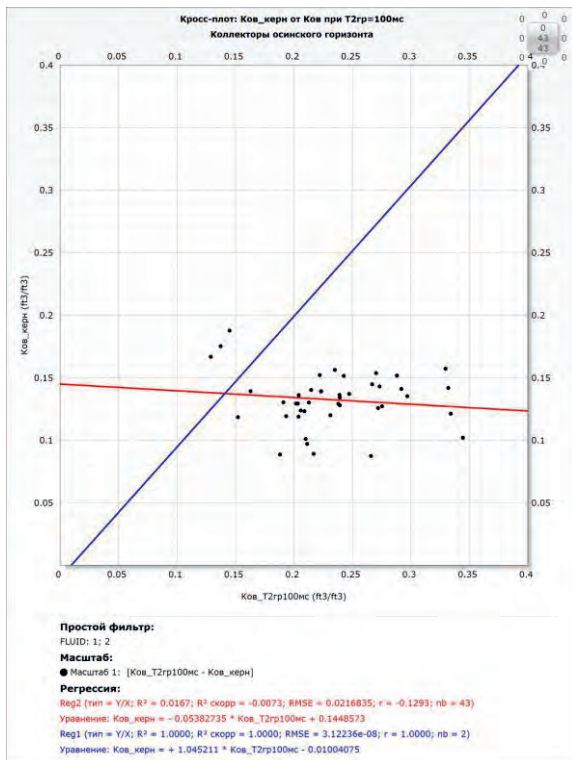
▼ Рис. 2. Сопоставление Ков ядра (эталон) и Ков ЯМК в скважине 1:
Условные обозначения: Синяя линия – линия равных значений,
красная линия – эмпирическая линейная регрессия.



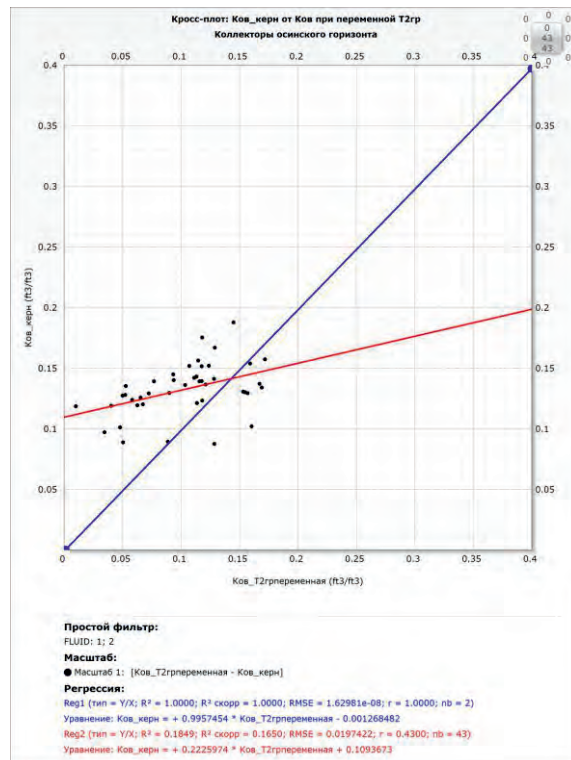
А – T2CutOff – 100 мс



Б – T2CutOff – переменная

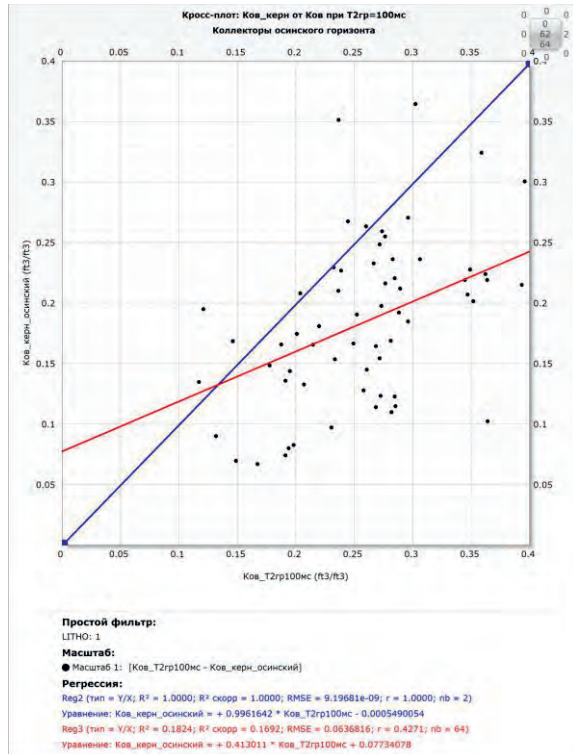


А – T2CutOff – 100 мс

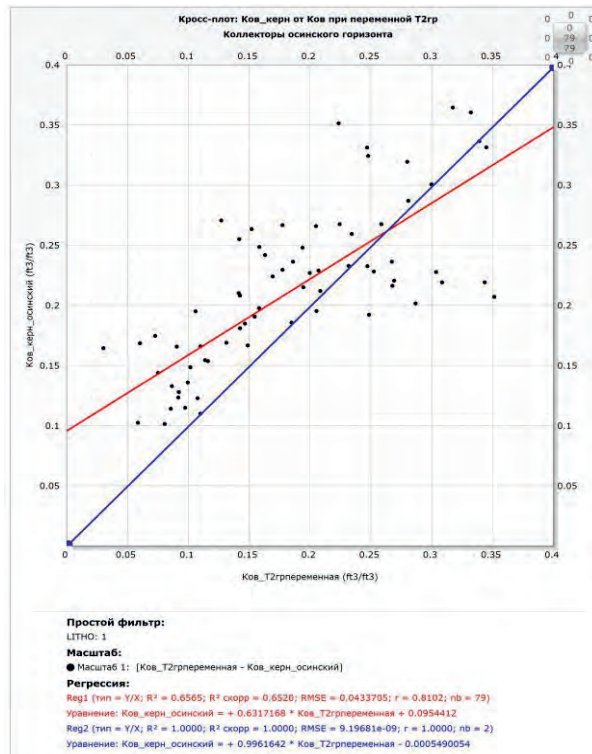


Б – T2CutOff – переменная

▲ Рис. 3. Сопоставление Ков керна (эталон) и Ков ЯМК в скважине 2.
Условные обозначения: Синяя линия – линия равных значений,
красная линия – эмпирическая линейная регрессия.



А – T2CutOff – 100 мс



Б – T2CutOff – переменная

▲ Рис. 3. Сопоставление Ков керна (эталон) и Ков ЯМК в скважине 2.
Условные обозначения: Синяя линия – линия равных значений,
красная линия – эмпирическая линейная регрессия.

(рис. 2,3,4):

1. Ков_ T2CutOff = 100мс — по стандартной методике с фиксированной отсечкой;
2. Ков_ T2CutOff _переменная — по новой методике с переменной отсечкой;
3. Ков_кern — эталонное значение из подсчета запасов.

При сравнении регрессионных моделей стандартной и переменной отсечек наблюдается следующее:

При использовании фиксированной отсечки T2CutOff = 100 мс (рис. 2А, 3А, 4А) наблюдается устойчивое смещение облаков точек для всех трех скважин вправо от синей линии 45°. Это указывает на завышение рассчитанных значений Ков относительно эталонных керновых данных.

Данный вывод наглядно подтверждается на планшетах ЯМР (рис. 1А, 1Б, 1В, трек 10), где синяя кривая (Ков при T2CutOff = 100 мс) в интервалах коллекторов устойчиво проходит выше эталонной красной кривой (Ков по керну), что визуально демонстрирует систематическое завышение.

Как следствие, ФЕС коллекторов могут занижаться: коэффициент эффективной пористости (FFV) рассчитывается некорректно, что приводит к пропуску коллекторов в интервалах, где FFV оказывается ниже граничного значения (Кпэффгр = 0.03).

При использовании предлагаемой методики с переменной отсечкой T2CutOff (рис. 2Б, 3Б, 4Б) облака точек демонстрируют существенно лучшую сходимость с эталоном, располагаясь ближе к линии 45°. Хотя наблюдается незначительная тенденция к занижению, в целом смещение является несистематическим, а результаты — более точными.

Визуальный анализ кривых коэффициента остаточной водонасыщенности на рис. 1 (трек 10) однозначно показывает, что зеленая кривая (Ков по переменной T2CutOff) в интервалах коллекторов лежит существенно ближе к эталонной красной кривой, повторяя ее форму и значения, что является прямым подтверждением более высокой точности предлагаемой методики.

Это свидетельствует о том, что ФЕС пластов, рассчитанные по новой методике, близки к реальным, а границы коллекторов выделяются корректно.

Оценка и сравнение подвижностей пластового флюида

В рассматриваемых скважинах, помимо стандартного комплекса ГИС, были проведены гидродинамические исследования (ГДК), что позволило сравнить прямые замеры подвижности с расчетными по ЯМК.

Для оценки соответствия расчетных данных прямым замерам была вычислена вязкость флюида μ по формуле Жана [9]:

$$\mu = \frac{9,56T}{T_2}, \quad (3)$$

где μ — вязкость, Сп;

T — температура, К;

T2 — время поперечной релаксации, мс.

Подвижность определялась как отношение проницаемости (КТИМ) по модели Коатса-Тимура к вязкости μ :

$$\text{Подвижность}_{\text{ЯМК}} = \frac{\text{КТИМ}}{\mu}$$

Визуальный анализ кривых подвижности (рис. 1А, 1Б, 1В, трек 11) показывает, что в большинстве интервалов отбора красные точки (ГДК) лежат ближе к зеленой кривой, чем к синей. Это указывает

на то, что предлагаемая методика обеспечивает более точное и достоверное соответствие профиля подвижности прямым гидродинамическим измерениям.

Выводы

Применение алгоритма переменной T2CutOff, адаптированного к изменению пористости по разрезу, доказало свою корректность и эффективность для данного месторождения. Результаты показывают более точное соответствие как эталонным керновым данным по водонасыщенности, так и прямым гидродинамическим замерам по подвижности, что позволяет рекомендовать данную методику для дальнейшего использования.

Литература

1. Джафаров И.С., Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Применение метода ядерного магнитного резонанса для характеристики состава и распределения пластовых флюидов. М.: Химия, 2002. 437 с.
2. Coates G.R., Xiao L., Prammer M.G. NMR logging. Principles and applications. Houston: Halliburton Energy Services, 1999. 253 p.
3. Зарипова Л.Ф., Самохвалов Н.И. Определение динамической пористости карбонатных коллекторов по данным ЯМР // Нефть и газ - 2022: Тезисы докладов 76-ой международной молодежной научной конференции, Москва, 25–29 апреля 2022 года / Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина. Т. 1. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2022. С. 24–25.
4. Аксельрод С.М. Ядерно-магнитные методы при изучении фильтрационных и емкостных свойств карбонатных коллекторов (по материалам американских публикаций) // Каротажник. 2003. № 110. С. 10–35.
5. Marschall D., Gardner J., Curby F.M. MR laboratory measurements: Requirements to assure successful measurements that will enhance MRI Log Interpretation // Society of Core Analysts Chapter-at-Large. 1997. P. 12–12.
6. Кузьмин В.А. Определение остаточной водонасыщенности пород лабораторными методами // Нефтяное хозяйство. 2015. № 2. С. 44–48.
7. Рудаковская С.Ю., Симоненко Е.П., Скороходова Т.Б. Трудности расчета коэффициента остаточной водонасыщенности на основе исследований керна в некоторых типах разреза // Каротажник. 2023. № 4(324). С. 47–61.
8. Stefanelli D., Santos L.T., Vidal A.C. Fast permeability estimation using NMR well logging data log-normal decomposition // Geoenergy Science and Engineering. 2023. Vol. 231, Part A. P. 212368. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212368>
9. Hui H., Zhang Y. Toward a General Viscosity Equation for Natural Anhydrous and Hydrous Silicate Melts // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2007. Vol. 71. P. 403–416. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.09.003>