

2. Ядерно-магнитный томографический каротаж / Р. Т. Хаматдинов, Е. М. Митюшин, В. Ю. Барляев, В. А. Мурцовкин, А. В. Малинин // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2002. Вып. 100. С. 138–169.
3. Пат. 2181901 РФ. Способ каротажа с использованием ядерно-магнитного резонанса и устройство для его осуществления / Митюшин Е. М., Барляев В. Ю., Хаматдинов Р. Т. 2002.
4. Малинин А. В. О некоторых возможностях ядерно-магнитного каротажа при геолого-техническом моделировании // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2004. Вып. 116–117. С. 23–43.
5. Khamatdinov R., Mityushin E., Murtsovkin V., Tiller D., Jonkers J. 2003, Field Test of a New Nuclear Magnetic Resonance Tool: Paper AAA. SPWLA 44 Annual Logging Symposium.

УДК 550.832.582

B. A. Mурцовкин, A. C. Зеленов
ООО "Нефтегазгеофизика"

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ ЯДЕРНО-МАГНИТНОГО КАРОТАЖА

В работе представлены результаты, указывающие, что данные ядерно-магнитного каротажа (ЯМК) могут быть использованы не только для оценки проницаемости горных пород, но также и для расчета их электропроводности. В основе предлагаемого подхода лежит капиллярно-решеточная модель порового пространства. Показано, что совместное использование данных ЯМК с результатами электрического каротажа позволяет выделять пласти, содержащие углеводороды.

Одним из достоинств метода ЯМК при изучении свойств горных пород является возможность получения информации о распределении пористости по размерам пор. Это позволяет не только определять общую пористость пород, но и разложить ее на компоненты: микропористость глин, пористость, заполненную капиллярно-связанной водой, и пористость со свободным флюидом (с выделением каверновой составляющей) [1, 2].

С другой стороны, именно распределение пор по размерам является основным фактором, определяющим такие процессы переноса, как фильтрация и электропроводность. Однако на практике для интерпретации данных ЯМК используются эмпирические подходы, учитывающие лишь интегральные или усредненные параметры спектральных распределений сигнала ЯМК, такие, например, как доли свободной и связанной воды или среднелогарифмическое время поперечной релаксации намагниченности флюидов T_2 . Так, например, за рубежом для оценки проницаемости наиболее широко используются два следующих подхода [3–5].

Модель Тимура-Коатеса

$$k_{\text{пр}} = a_{TC} k_{\pi}^{b_{TC}} \left(\frac{k_{\pi, \text{своб}}}{k_{\pi, \text{кап.св}}} \right)^{c_{TC}} \quad (1)$$

где k_{π} – коэффициент пористости; $k_{\pi, \text{своб}}$ – пористость, занятая свободным флюидом (ИСФ); $k_{\pi, \text{кап.св}}$ – содержание капиллярно-связанной воды; a_{TC} , b_{TC} и c_{TC} – эмпирические константы. Значения констант a_{TC} , b_{TC} и c_{TC} подбираются для каждого типа пород на основе соответствующих лабораторных измерений на образцах этих пород.

Значения $k_{\pi, \text{кап.св}}$ и $k_{\pi, \text{эф}}$ определяются по спектру времен релаксации с помощью специальных отсечек, позволяющих разделить воду на подвижную, капиллярно-связанную и воду глин. Значения этих отсечек также определяются из лабораторных ЯМР-исследований соответствующих типов пород.

Модель среднего логарифмического времени релаксации T_2

$$k_{\text{пр}} = a_{LM} k_{\pi}^{b_{LM}} T_{2LM}^{c_{LM}}, \quad (2)$$

где a_{LM} , b_{LM} и c_{LM} – эмпирические константы, которые, как и в предыдущем случае, определяются в процессе лабораторных ЯМР-исследований соответствующих типов пород. Среднее логарифмическое время T_{2LM} определяют непосредственно из спектра времен поперечной релаксации по формуле

$$T_{2LM} = \exp\left(\frac{\sum \Delta k_{ni} \cdot \ln T_{2i}}{k_n}\right), \quad (3)$$

где Δk_{ni} – доля пористости, определяемая по спектру T_2 и соответствующая времени релаксации T_{2i} .

Осложняющим обстоятельством при использовании этих моделей является значительная вариабельность эмпирических констант, входящих в расчетные соотношения для проницаемости [6]. При этом существенно могут изменяться не только множители a_{TC} и a_{LM} , но и показатели степени. На практике при отсутствии информации о значениях показателей степени в формулах (1) и (2) обычно полагают, что $b_{TC} = b_{LM} = 4$ и $c_{TC} = c_{LM} = 2$. Кроме того, при использовании формулы (1) возникают вполне определенные трудности, связанные с выбором отсечек, разделяющих воду на свободную, капиллярно-связанную и воду глин.

Следует также отметить, что рассмотренные модели по своей сути нечувствительны ко многим особенностям конкретных спектральных распределений времен релаксации, поскольку разные по форме спектры могут иметь одинаковые интегральные или усредненные характеристики. В результате подобные подходы не позволяют в полной мере использовать возможности получаемой при ЯМК информации.

Капиллярно-решеточная модель

В настоящей работе предпринята попытка оценить электропроводность и проницаемость водонасыщенных горных пород непосредственно по спектрам времен релаксации намагниченности порового флюида T_2 , учитывая конкретные особенности их распределения. В основе этого подхода лежит капиллярно-решеточная модель порового пространства горных пород, предложенная в работе [7].

В этой модели поровое пространство представлено в виде трехмерной кубической решетки капилляров. Ее отличие от аналогичных моделей подобного типа заключается в способе учета распределения пор по размерам. Этот способ основан на том, что пористая среда разбивается на большое число одинаковых по размеру кубических ячеек. На каждую ячейку приходится один узел, в котором происходит пересечение трех взаимно перпендикулярных капилляров. Структура пор во всех ячейках одинакова. Отличие между ячейками зак-

лючается лишь в размере δ соответствующих им пор, который для всех пор в пределах одной ячейки принимается одинаковым.

Распределение размеров пор по ячейкам характеризуется некоторой функцией $f(\delta)$, которая по своему физическому смыслу представляет собой плотность вероятности того, что в произвольной ячейке поры имеют размер δ , и которая может быть определена непосредственно по спектру времен поперечной релаксации. Эта возможность, в свою очередь, основана на том, что время поперечной релаксации в поре пропорционально ее размеру. Исходя из этих представлений, в работе [7] для расчета проницаемости было получено выражение

$$k_{\text{пп}} = \frac{0,07}{a^2} \int_0^a \int_0^a \frac{(\delta_1 \delta_2)^4}{\delta_1^4 + \delta_2^4} f(\delta_1) f(\delta_2) d\delta_1 d\delta_2, \quad (4)$$

где a – размер кубических ячеек, в качестве которого используется максимальный размер пор δ_{\max} . Индексы 1 и 2 у переменной интегрирования δ в этом выражении отражают двукратное интегрирование по спектру T_2 . Принимая во внимание, что $\rho T_2 = V/S$, где V и S – соответственно объем и площадь поверхности пор в ячейке, а ρ – поверхностная релаксационная активность, выражение (4) можно привести к виду

$$k_{\text{пп}} = 0,252 \rho^2 T_m^4 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{(T_{2i} T_{2j})^2}{T_{2i}^4 + T_{2j}^4} \cdot \frac{\Delta k_{\text{pi}}}{3T_m - 2T_{2i}} \cdot \frac{\Delta k_{\text{pj}}}{3T_m - 2T_{2j}}, \quad (5)$$

где $\Delta k_{\text{pi(j)}}$ – доли пористости, соответствующие временам релаксации $T_{2i(j)}$. Эти величины определяются непосредственно из спектра T_2 . Значение T_m соответствует максимальному времени релаксации в спектре T_2 .

Можно показать, что в случае достаточно узкого спектра T_2 выражение (5) существенно упрощается и принимает вид

$$k_{\text{пп}} = 0,014 (\rho \cdot k_{\text{п}} \cdot T_m)^2. \quad (6)$$

Нетрудно видеть, что это выражение по своей структуре совпадает с формулой (2), тем более что, как правило, коэффициент c_{LM} принимается равным 2.

К преимуществам предлагаемой модели можно отнести отсутствие необходимости использовать в спектре отсечки для разделения воды

на связанную и свободную, как в формуле (1), а также то, что вместо трех эмпирических констант (a_{TC} , b_{TC} , c_{TC} или a_{LM} , b_{LM} , c_{LM}) используется только одна, имеющая вполне определенный физический смысл константа – поверхностная релаксационная активность ρ .

Используя аналогичный подход, на основе капиллярно-решеточной модели в работе [7] получено соотношение для расчета параметра пористости горных пород P_{π} . Соответственно выражения для расчета параметра пористости через размеры пор и времена релаксации в спектре T_2 будут иметь вид

$$P_{\pi} = \frac{a^2}{2} \left(\iint_{0,0}^{a,a} \frac{(\delta_1 \delta_2)^2}{\delta_1^2 + \delta_2^2} f(\delta_1) f(\delta_2) d\delta_1 d\delta_2 \right)^{-1}. \quad (7)$$

$$P_{\pi} = \frac{1}{2T_m^4} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{T_{2i}^2 + T_{2j}^2} \cdot \frac{\Delta k_{\pi i}}{3T_m - 2T_{2i}} \cdot \frac{\Delta k_{\pi j}}{3T_m - 2T_{2j}} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Важной особенностью является то, что согласно формуле (8) параметр пористости горных пород может быть определен по данным только ЯМР-измерений и для его расчета не нужно никаких дополнительных параметров, требующих проведения специальных исследований. Это не только упрощает процедуру расчетов, но также исключает фактор субъективности, который может проявляться, когда необходимо “настраивать” модель дополнительными параметрами под конкретные условия измерений или типы пород.

Однако полученные соотношения для расчета электропроводности и проницаемости справедливы при условии изменения размеров пор в сравнительно узком диапазоне (в пределах порядка). В случае широкого спектра ЯМР, когда размер пор изменяется в пределах нескольких порядков, что справедливо, например для глинистых коллекторов, процедура расчета электропроводности и проницаемости усложняется. В этом случае необходимо использовать две (в редких случаях три) капиллярных решетки с разным масштабом ячеек, каждой из которых будет соответствовать своя часть спектра T_2 . При этом капиллярной решетке с мелкими ячейками будут преимущественно соответствовать поры глин и поры с капиллярно-связанной водой, а решетка с большими ячейками будет состоять из наиболее крупных пор, определяющих основной вклад в фильтрацию.

Следует отметить, что задача разбиения порового пространства на разномасштабные капиллярные решетки по своей физике неэквивалентна задаче о разделении свободной и связанной воды и ее решение может быть лишь приближенно использовано для оценки подобного разделения.

Для расчета проницаемости и проводимости каждой из таких решеток справедливы, соответственно, выражения (5) и (8), в которых суммирование проводится по отвечающим каждой из решеток части спектра T_2 . Полная электропроводность или проницаемость системы нескольких решеток равна сумме этих величин для каждой из решеток, что соответствует их параллельному включению.

Поскольку обоснование необходимости, а также сама процедура разбиения спектра T_2 на разномасштабные капиллярные решетки представляет собой достаточно громоздкую математическую задачу, рассмотрение которой не является целью настоящей работы, ограничимся лишь приведенным здесь кратким описанием используемой в данной работе общей схемы расчета электропроводности и проницаемости.

Примеры практического использования капиллярно-решеточной модели

Для иллюстрации возможностей предлагаемой капиллярно-решеточной модели рассмотрим некоторые результаты ее использования для расчетов проницаемости и электропроводности горных пород для разных месторождений, которые проводились как для образцов керна, так и по данным ЯМК. Для исследования керна использованы ЯМР-релаксометр CoreSpec-1000. Скважинные измерения проводились прибором ЯМТК, подробное описание которого дано в работах [8, 9].

Основная задача таких исследований заключалась в сравнении результатов расчетов проницаемости и электропроводности по спектрам T_2 на основе решеточной модели с результатами их лабораторных и скважинных измерений. Особый интерес при этом был связан с анализом возможности использования для таких расчетов скважинных данных ЯМК, для которых соотношение сигнал/шум существенно ниже, чем для лабораторных измерений.

Определение проницаемости горных пород по спектрам T_2

Результаты сравнения проницаемости образцов керна, рассчитанной по данным ЯМР для трех разных моделей (Тимур-Коатес, сред-

нее T_2 , решеточная модель) и измеренной по фильтрации азота, приведены на рис. 1. Расчет проницаемости по формулам (1) и (2) проведен, соответственно, при $b_{TC} = 4$; $c_{TC} = 2$ и $b_{LM} = 4$; $c_{LM} = 2$. Из сопоставления рисунков *a*, *б* и *в* следует, что решеточная модель в целом дает наилучшее совпадение с данными измерений, о чем свидетельствуют значения коэффициентов корреляции $k_{\text{кор}}$, которые для трех рассмотренных моделей соответственно равны 0,474; 0,747 и 0,855. Разнообразие свойств исследованных пород позволяет говорить о возможности применения решеточной модели для достаточно широкого класса терригенных коллекторов.

Пример определения проницаемости по скважинным измерениям спектров T_2 методом ЯМК с использованием решеточной модели показан на рис. 2.

Определение электропроводности горных пород по спектрам T_2

Проверка возможности использования модели для расчета электрического сопротивления проводилась на тех же образцах горных пород, что и в случае аналогичной проверки при расчете проницаемости (рис. 1). Сравнение рассчитанных значений параметра пористости с результатами его прямых измерений на образцах керна показано на рис. 3. Обнаруживая в целом неплохую сходимость ($k_{\text{кор}} = 0,943$), результаты расчета тем не менее дают несколько заниженные значения сопротивления в области низких пористостей ($k_n < 5\%$) и завышенные в области высоких пористостей ($k_n > 25\%$).

Примеры использования решеточной модели для расчета сопротивления пластов по данным ЯМК представлены на рис. 4. Чтобы проиллюстрировать возможный диапазон использования модели для пластов с разной литологией, сравнение результатов расчета сопротивления по ЯМК с результатами его измерения методом индукционного каротажа проведены для пластов с хорошими коллекторскими свойствами (рис. 4, *а*) и для глинистых отложений (рис. 4, *б*). С учетом снижения отношения сигнал/шум при скважинных ЯМК-исследованиях, а также разной разрешающей способности ЯМК и ИК измерений согласие результатов этих двух методов можно считать вполне удовлетворительным (рис. 4, последняя колонка).

Предложенную методику расчета сопротивления горных пород по спектрам T_2 следует использовать только в случае полностью водо-

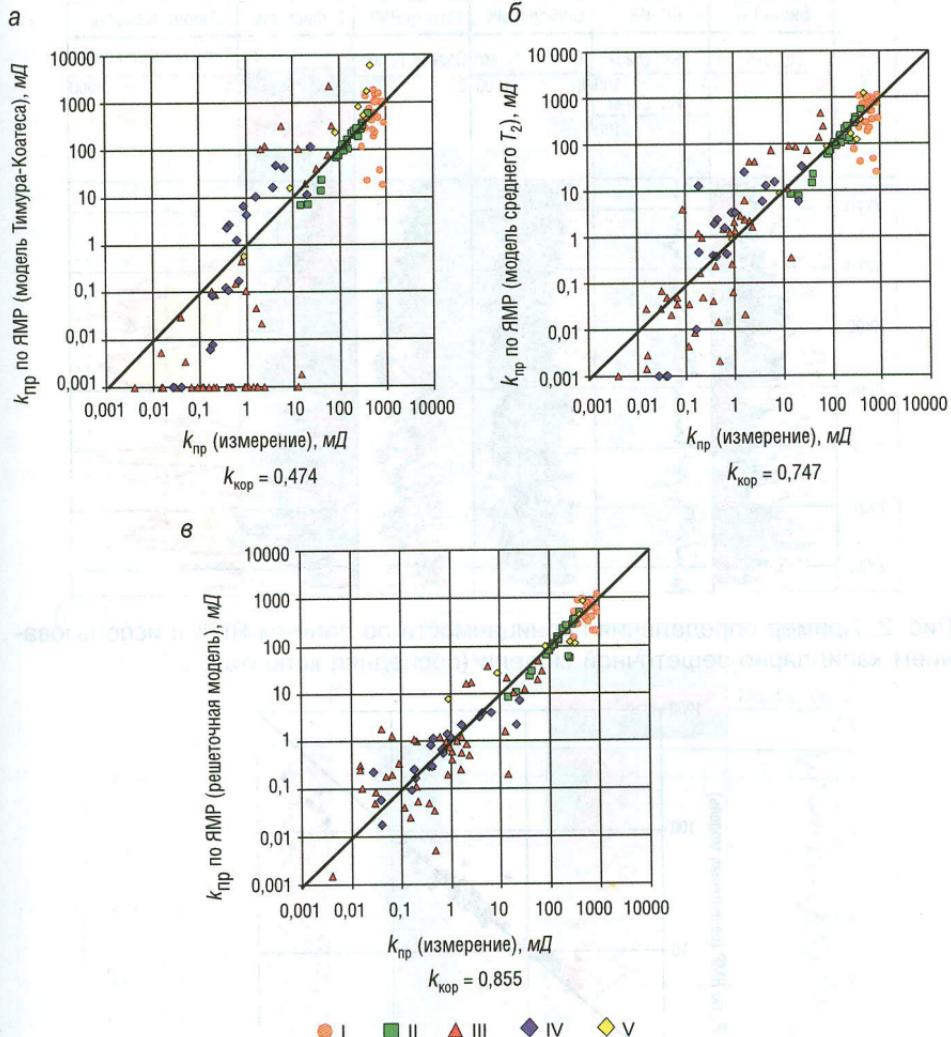


Рис. 1. Сравнение результатов прямого измерения проницаемости образцов керна (по фильтрации азота) с результатами ее расчета по данным ЯМР для разных моделей:

а – модель Тимура-Коатеса; б) модель среднего логарифмического T_2 ; в – капиллярно-решеточная модель. Шифр образцов пород: I–IV – Западно-Сибирская НГП (I – сеноманские, II – неокомские, III – юрские, IV – ачимовские отложения); V – Тимано-Печорская НГП (отложения среднего девона)

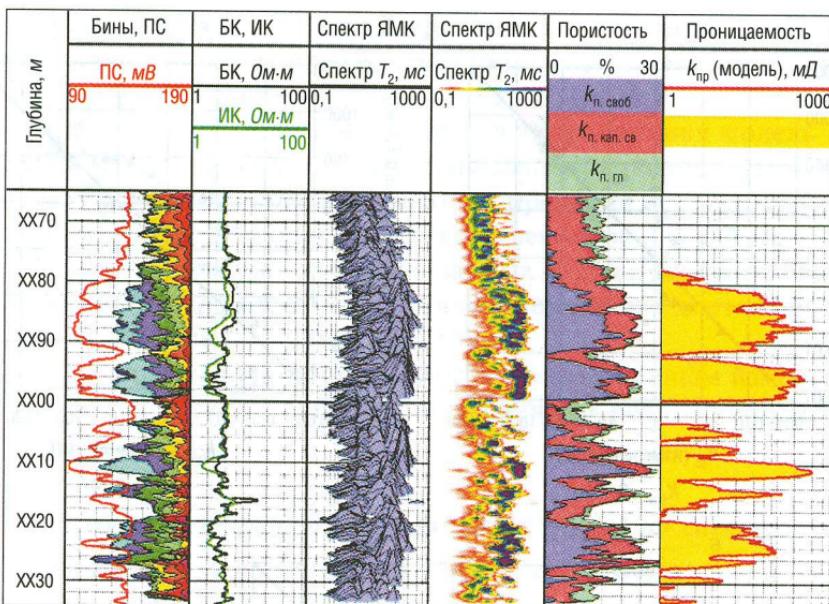


Рис. 2. Пример определения проницаемости по данным ЯМК с использованием капиллярно-решеточной модели (последняя колонка)

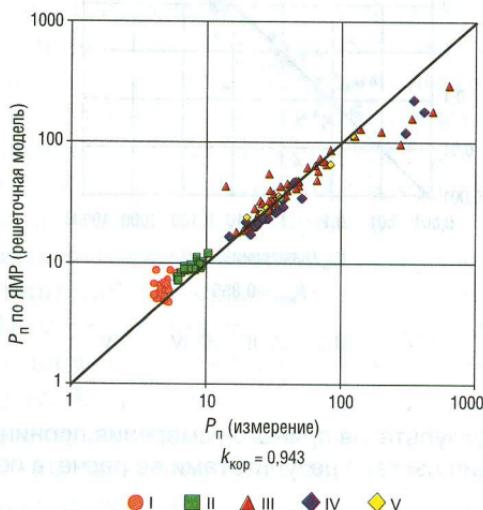


Рис. 3. Сравнение результатов расчета параметра пористости образцов керна по данным ЯМР при использовании капиллярно-решеточной модели с результатами измерения. Шифр образцов пород как на рис. 1

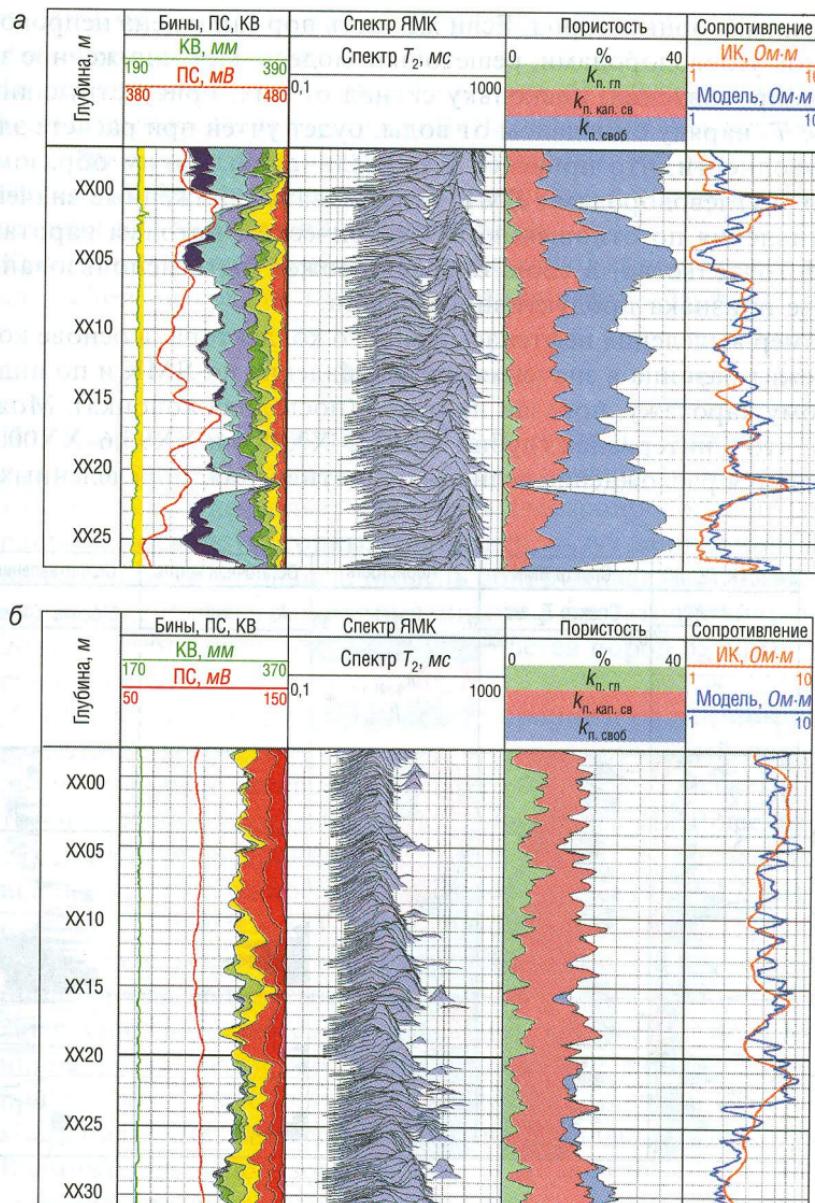


Рис. 4. Сравнение результатов определения удельного сопротивления по данным индукционного и ядерно-магнитного каротажа (последняя колонка) для пластов-коллекторов (а) и глинистого пласта (б)

насыщенных горных пород. Если же часть пор заполнена непроводящими ток углеводородами, решеточная модель даст заниженное значение сопротивления, поскольку сигнал от них, присутствующий в спектре T_2 наряду с сигналом от воды, будет учтен при расчете электропроводности, что приведет к ее увеличению. Таким образом, в пластах с углеводородами ЯМК будет давать заниженные значения сопротивления по отношению к электрическим методам каротажа. Это обстоятельство, в свою очередь, может быть использовано в качестве признака продуктивного пласта.

Пример выделения нефтенасыщенного коллектора, в основе которого лежит разница в значениях сопротивления по ЯМК и по индукционному каротажу, показан на рис. 5 (последняя колонка). Можно видеть, что в интервалах глубин XX07,2–XX08,4 и XX95,6–XX00,0 м наблюдается расхождение величин сопротивления, определенных по

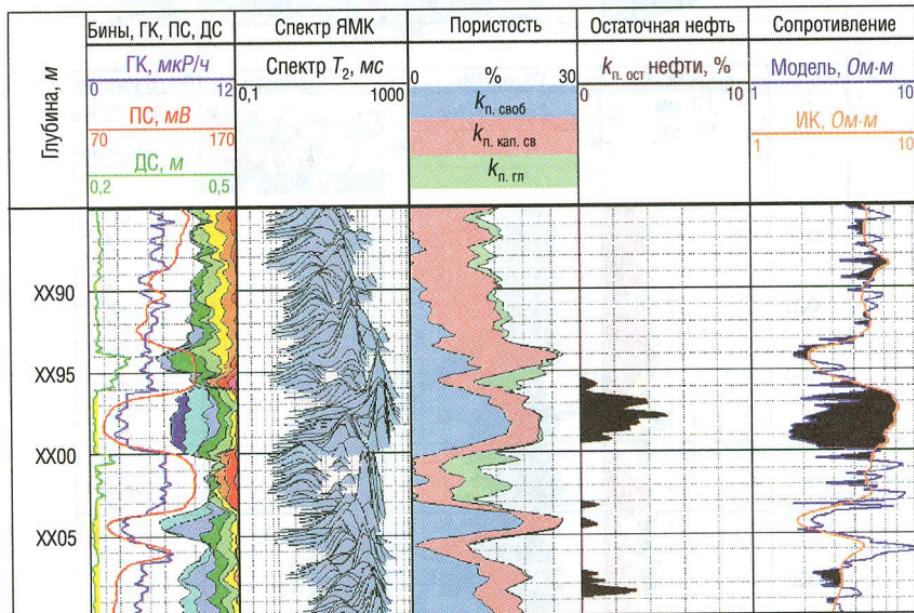


Рис. 5. Пример выделения нефтенасыщенного пласта при расхождении результатов определения сопротивления по данным индукционного и ядерно-магнитного каротажа (последняя колонка, интервалы глубин – XX07,2–XX08,4 и XX95,6–XX00,0 м)

двум этим методам, что является признаком наличия нефти в соответствующих отложениях.

Подтверждением этому могут служить результаты определения нефтенасыщенности, представленные на рис. 5 (предпоследняя колонка), которые были получены так называемым методом усиленной диффузии [3, 4], традиционно используемым в практике ЯМК для выделения нефтенасыщенных коллекторов.

Как следует из рис. 5, оба метода выделяют хорошо совпадающие между собой интервалы глубин залегания нефте содержащих пород.

Заключение

- Представленные результаты лабораторных и скважинных исследований указывают на то, что рассмотренная капиллярно-решеточная модель позволяет описывать электропроводящие и фильтрационные свойства горных пород, используя данные метода ядерно-магнитного резонанса. Модель обнаруживает неплохую сходимость с экспериментальными данными в достаточно широком диапазоне проводимостей и проницаемостей пород разного литологического состава.
- Для настройки модели при расчете проницаемости, помимо данных ЯМР, требуется только один дополнительный параметр – релаксационная активность ρ . При расчете же параметра пористости P_n используются исключительно данные ЯМР-исследований без привлечения дополнительных настроек параметров, что исключает возможность какой-либо субъективной "подгонки" результатов расчетов. Таким образом, спектр времен релаксации T_2 содержит всю информацию, необходимую для расчета электропроводности водонасыщенных пород.
- Занизение значений сопротивления по данным ЯМР по отношению к результатам его прямых измерений является признаком присутствия углеводородов в коллекторе, при этом величина расхождения является мерой насыщенности пласта углеводородами.
- Возможность использования единой модели порового пространства для описания разных по своей физической природе процессов – электропроводности и фильтрации – служит в определенной степени свидетельством ее внутренней непротиворечивости, что позволяет надеяться, что развивающиеся на ее основе подходы смо-

гут быть использованы для расчетов и других характеристик горных пород, таких, например, как кривые капиллярного давления, насыщенность, фазовые проницаемости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мурцовкин В. А., Топорков В. Г. Новая ЯМР-технология петрофизических исследований керна, шлама и флюидов // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2000. Вып. 69. С. 84–97.
2. Toporkov V. G., Murtsovkin V. A., Rudakovskaya S. Yu. Evaluation of Filtration and Capacitive Properties of Rocks by Nuclear Magnetic Resonance in Terrigenous Non-Consolidated Section With Swelling Clay Minerals. Proceedings of SCA 2001 Symposium. Edinburgh. Paper 2001–64.
3. Dunn K.-J., Bergman D. J., LaTorraca G. A. Nuclear Magnetic Resonance. Petrophysical and Logging Applications. Pergamon. 2002. 294 p.
4. Коатес Д. Р., Хуао Л. Ч., Праммер М. Д. Каротаж ЯМР. Принципы и применение. Хьюстон. Халибартон. 1999. 336 с.
5. Аксельрод С. М. Петрофизическое обоснование ЯМК в поле постоянных магнитов. Методология и результаты лабораторных исследований ЯМР-свойств пород (По публикациям в американской геофизической печати) // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 1999. Вып. 59. С. 28–47.
6. Kubica P. Statistical Tests of Permeability Estimates Based on NMR Measurements, paper VVV, in 36th Annual Logging Symposium Transactions, 1995: SPWLA.
7. Мурцовкин В. А. Модель для расчета характеристик пористых сред / Коллоидный журнал. 2002. Т. 64. № 3. С. 1–6.
8. Хаматдинов Р. Т., Митюшин Е. М., Барляев В. Ю., Мурцовкин В. А., Малинин А. В. Ядерно-магнитный томографический каротаж // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2002. Вып. 100. С. 138–171.
9. Митюшин Е. М., Барляев В. Ю., Мурцовкин В. А., Хаматдинов Р. Т. Первый российский прибор ядерно-магнитного каротажа с использованием поля постоянных магнитов // Геофизика. 2002. Т. 1. С. 43–50.