The Bazhenov Formation Rocks Wettability by NMR

S. Borisenko* (Arctic-GERS, LLC), P. Koshkin (Arctic-GERS LLC), S. Rudakovskaya (Arctic-GERS, LLC), N. Bogdanovich (Skolkovo Institute of Science and Technology)

SUMMARY

The petrophysical characteristics determination of the Bazhenov formation rocks is very difficult. Previously used adsorption method to study the wettability, due to the large organic matter content in the mineral matrix, showed a high degree of hydrophilicity. There is proposed an alternative approach to determining the "wettability index" using the NMR method by direct spectra comparison of rock saturated with water and kerosene. This approach allows successfully solving the organic matter content problem and controlling the results obtained by the adsorption method correctness. As a result, the "wettability index" according to NMR of the Bazhenov formation varies from neutral (in the top and bottom) to hydrophobic wettability (in the middle of the section), which correlates well with the distribution of organic matter.

Определение смачиваемости пород баженовской свиты методом ядерной магнитной релаксометрии

С.А. Борисенко* (ООО «Арктик-ГЕРС»), П.В. Кошкин (ООО «Арктик-ГЕРС»),
С.Ю. Рудаковская (ООО «Арктик-ГЕРС»), Н.Н. Богданович (Сколковский институт науки и технологий)

Введение

Одним из важнейших факторов, влияющих на распределение флюидов в пласте, а, следовательно, на процессы вытеснения углеводородов и коэффициент извлечения нефти, является смачиваемость. Поведение флюидной системы в нефтяном пласте коллектора в корне отличается для гидрофильных и гидрофобных пород и зависит от степени гидрофобизации минеральной поверхности.

Особенности строения пород баженовской свиты делают невозможным или крайне затруднительным определение большинства петрофизических характеристик, в том числе и смачиваемости. Из всего многообразия наиболее распространенных лабораторных методов по оценке смачиваемости минеральной поверхности остаются доступными лишь метод «лежащей капли» и адсорбционный. Точность метода «лежащей капли» крайне низка, а адсорбционный метод не позволяет определять смачиваемость пород, содержащих большое количество органического вещества [1], в то время как метод ядерной магнитной релаксометрии (ЯМР) лишен этого недостатка. Поэтому при определении смачиваемости пород баженовской свиты на примере нескольких скважин Сургутского и Красноленинского сводов основной акцент был сделан именно на измерениях методом ЯМР.

Метод ЯМР

Метод ядерной магнитной релаксометрии является мощным неинвазивным инструментом исследования пустотного пространства образца, типа насыщающих флюидов и их распределения в порах. Данный метод основан на взаимодействии атомных ядер и внешних магнитных полей (явление ядерного магнитного резонанса — ЯМР). В присутствии внешнего магнитного поля ядра большинства химических элементов прецессируют (при классическом рассмотрении) вокруг направления постоянного внешнего магнитного поля с Ларморовой частотой, определяемой значениями гиромагнитного отношения (свойство регистрируемого элемента) и индукции магнитного поля. При взаимодействии магнитных ядер с прикладываемым в определенные моменты времени переменным магнитным полем той же частоты (импульсная релаксометрия) индуцируются измеряемые сигналы. ЯМР-измерения могут производиться на любом ядре, имеющем нечетное количество протонов или нейтронов, как например, ядро водорода (^1H), углерода (^{13}C) и натрия (^{23}Na). Водород, имеющий только один протон и ни одного нейтрона, в изобилии встречающийся в воде и углеводородах, а также обладающий наибольшей относительной интенсивностью сигнала, выбран безусловным объектом ЯМР-измерений в геофизических исследованиях, в отличие от представляющих интерес ^{12}C (нет ЯМР сигнала) и изотопа ^{13}C (низкая концентрация в естественных условиях и слабый ЯМР сигнал) [2], [3], [4].

Классический ЯМР эксперимент состоит из нескольких этапов:

- Измерение методом Карра-Пёрселла-Мейбум-Гилла кривой поперечной релаксации, представляющей собой сигнал вида

$$A(t) = \sum_i B_i e^{\frac{-t}{T_{2i}}}$$

с нормально распределенным (в идеале) шумом.

- Обратная задача по преобразованию этого суммарного сигнала в распределение амплитуд составляющих сигналов по временам поперечной релаксации. С точки зрения математики подобная процедура сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода, т.е. к нахождению распределения $B(T_2)$, и относится к классу, так называемых, некорректно поставленных задач [5].

$$\bullet \int_{T_{2\min}}^{T_{2\max}} B(T_2) \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} dT_2 = A(t)$$

Здесь t - время; $A(t)$ - сигнал ЯМР релаксации; $T_{2\min}$ и $T_{2\max}$ – соответственно, минимальное и максимальное значения время поперечной релаксации (определяемые условиями эксперимента).

Результатом решения является парциальный (инкрементный) спектр, по сути – гистограмма, так как полная амплитуда сигнала определяется суммированием дискретных точек, а не интегрированием кривой спектра. В силу того, что абсцисса изменяется на порядки и обязывает использовать логарифмическое представление шкалы, такой вариант является наиболее удобным для визуализации и интерпретации.

- Восстановление теоретической кривой из полученного распределения сигнала по временам релаксации.
- Контроль совпадения теоретической кривой с экспериментальными данными.

Исследования смачиваемости методом ЯМР

Отдельный интерес представляет изучение спектров одного и того же образца с различной флюидонасыщенностью, что позволяет провести качественную оценку смачиваемости поверхности. Соприкосновение смачивающей фазы с поверхностью пор приводит к усилению вклада в общую релаксацию поверхностной составляющей. Это приводит к смещению доли спектра смачивающей фазы в область меньших времен релаксации (Рисунок 1) относительно спектра данного флюида в свободном объеме. При этом спектр несмачивающей фазы существенно менее чувствителен к данным процессам. Так, спектр гидрофильного образца, насыщенного водой, оказывается в области более коротких времен релаксации, чем спектр того же образца, но насыщенного керосином. Впервые данный эффект был показан I. Foley [6].

Рисунок 1 Спектры воды и керосина и влияние смачиваемости на форму спектров для гидрофильных терригенных пород

Аналогичные изменения наблюдаются при исследовании состаривания экстрагированного образца в нефти при пластовой температуре в течение 30 суток (Рисунок 2). Спектры состаренного и естественно насыщенного образца (изолированного при отборе) достаточно близки друг к другу, однако спектр экстрагированного водонасыщенного образца смещен относительно них в область коротких времен, что указывает на гидрофилизующее действие экстракции на поверхность.

Рисунок 2 Сопоставление спектров естественно насыщенного, экстрагированного и экстрагированного состаренного образца гидрофильных терригенных пород

Исследование смачиваемости пород баженовской свиты

Как было показано выше, при действительной гидрофильности спектр водонасыщенного образца должен находиться в области меньших времен релаксации и иметь большую амплитуду, нежели спектр керосинонасыщенного образца и, наоборот, при гидрофобности в область меньших времен релаксации будет смещен спектр керосинонасыщенного образца. Данный эффект был использован для определения количественного «показателя смачиваемости» пород баженовской свиты.

Данный метод успешно разрешает неопределенность, связанную с наличием в породе нерастворимого органического вещества. Сложность такого подхода заключается в необходимости сохранения целостности образца керна при экстрагировании. Кроме того, метод сопоставления спектров является качественным и не подходит для массовой оценки свойств поверхности. Для количественной оценки смачиваемости наиболее удобным представлением «показателя смачиваемости» по ЯМР оказался логарифм отношения среднелогарифмических времен спектров керосинонасыщенного и водонасыщенного образца, соответственно:

$$W = \lg \frac{T_{lm}^{oil}}{T_{lm}^{water}}$$

Значения такого показателя обычно варьируют в интервале от -1 до $+1$, причем отрицательные соответствуют гидрофобности, нулевое – нейтральной смачиваемости, а положительные – гидрофильности поверхности. Для удобства сопоставления данных по смачиваемости, полученных методами адсорбции и ЯМР, параметр W был пересчитан в границах от 0 до 1 так, чтобы нулевое значение соответствовало гидрофильности, $0,5$ – нейтральной смачиваемости, а значения около 1 – гидрофобности поверхности. Авторами было изучено изменение смачиваемости по разрезу нескольких скважин Сургутского и Красноленинского сводов (Рисунок 3). Мощность баженовской свиты принята за 100% , каждая экспериментальная точка расположена на уровне, соответствующей глубине взятия образца. Видно, что значения «коэффициентов смачиваемости» соответствуют гидрофобной или нейтрально-гидрофобной смачиваемости, в то время как данные, полученные адсорбционным методом свидетельствуют о существенной гидрофилизации поверхности в некоторых интервалах [1].

Выводы

«Показатель смачиваемости» по данным ЯМР по разрезу баженовской свиты варьирует от нейтральной (в кровле и подошве) до гидрофобной смачиваемости (в середине разреза), что коррелирует с распределением органического вещества, приведенного в работе [1]. По мнению авторов, массовые эксперименты по определению смачиваемости адсорбционным методом на

породах баженовской свиты должны в обязательном порядке сопровождаться контролем методом ЯМР.

Рисунок 3 Варьирование «коэффициента смачиваемости» по разрезу пород баженовской свиты

Библиография

1. Борисенко, С. А. Оценка лиофильности пород баженовской свиты методами адсорбции и ЯМР / С. А. Борисенко, Н. Н. Богданович, Е. В. Козлова, М. Ю. Спасенных, Д. Е. Заграновская // Нефтяное хозяйство. 2017, № 3, С. 12 – 16.
2. С. М. Аксельрод, В. Д. Неретин. Ядерный магнитный резонанс в нефтегазовой геологии и геофизике, Москва: Недра, 1990.
3. P. N. Sen, P. Straley, W. E. Kenyon, M. S. Whittingham. Surface- to-Volume Ratio, Charge Density, Nuclear-Magnetic Relaxation, and Permeability in Clay-Bearing Sandstones // Geophysics, v. 55, № 1, pp. 61-69, 1990.
4. Т. Фаррар, Э. Беккер. Импульсная и Фурье-спектроскопия ЯМР, Москва: Мир, 1973.
5. Тихонов А.Н. Методы решения некорректно поставленных задач - М.: Наука, 1979. – 285 с.
6. Foley, I. Effect of paramagnetic ions on NMR relaxation of fluids at solid surfaces / I. Foley, S. A. Farooqui, R. L. Kleinberg // Journal of Magnetic Resonance. – 1996. – Ser. A 123. – №1. – P.95–104.

References

1. Borisenko, S. A. Estimating lyophilic properties of the Bazhenov formation rocks by adsorption and NMR methods / S. A. Borisenko, N. N. Bogdanovich, E.V. Kozlova, M.Yu. Spasennykh, D. E. Zagranovskaya // Oil industry, 2017. – №3. – p. 12-16.
2. S. M. Axelrod, V. D. Neretin. Nuclear magnetic resonance in oil and gas geology and petrophysics. M: Nedra, 1990. (in Russian)
3. P. N. Sen, P. Straley, W. E. Kenyon, M. S. Whittingham. Surface- to-Volume Ratio, Charge Density, Nuclear-Magnetic Relaxation, and Permeability in Clay-Bearing Sandstones // Geophysics, v. 55, № 1, pp. 61-69, 1990.
4. T. Farrar, E. Becker. Pulse and Fourier transform NMR introduction to theory and methods: Academic Press NY & London, 1971.
5. A. N. Tikhonov. Solutions of Ill-Posed – M.: Nauka, 1979. – 285 p. (in Russian)
6. Foley, I. Effect of paramagnetic ions on NMR relaxation of fluids at solid surfaces / I. Foley, S. A. Farooqui, R. L. Kleinberg // Journal of Magnetic Resonance. – 1996. – Ser. A 123. – №1. – P.95–104.