

C03

Express Method of Hydrocarbons Group Analysis and Rheological Properties Evaluation by NMR Relaxometry

A. K. Turakhanov* (Institute of Petroleum Geology and Geophysics), E.A. Fursenko (Institute of Petroleum Geology and Geophysics), V.N. Glinskikh (Institute of Petroleum Geology and Geophysics) & M.Y. Shumskayte (Institute of Petroleum Geology and Geophysics)

SUMMARY

Nuclear Magnetic Resonance (NMR) today is widely used in the oil industry for reservoir porosity and permeability estimations. But it is also vital in the oil industry to get information about rheological properties and composition of oil as early as possible. There are several methods of estimating fluid's viscosity basing on the NMR data, but no one is fully accepted. As for oil group analysis, there is a little material about low-field NMR relaxometry composition predictions in the literature, although hydrocarbon composition strongly influences on the rheological properties. That is why this work is devoted to hydrocarbons group analysis and rheological properties evaluation by NMR relaxometry.

Экспрессное изучение группового состава и реологических свойств углеводородов методом ЯМР-релаксометрии

А.Х. Тураханов*, В.Н. Глинских, Е.А. Фурсенко, М.И. Шумейкайте (ИНИТ СО РАН)

Введение

Изучение реологических свойств нефти и нефтесодержащих флюидов на ранней стадии изучения резервуаров углеводородов является важным, поскольку они определяют продуктивность пласта. Метод ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) достаточно давно используется для оценки реологических свойств шистовых флюидов (Freedman, Heaton 2004). На сегодняшний день метод позволяет оценивать вязкость нефти как в лабораторных условиях (Korb et al. 2015), так и непосредственно при исследованиях в скважинах (Shugan et al. 2016) на основе данных о характерных временах спада продольной (T_1) и поперечной (T_2) компонент вектора макроскопической намагниченности. Последнее время актуальным остается вопрос эффективной разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти высокой вязкости (Kausik et al. 2016; Зарипов и др. 2015), поэтому в этом направлении ЯМР-исследования ведутся особенно интенсивно.

Наряду с реологическими свойствами, при изучении жидких углеводородов крайне важно знать состав нефтесодержащего флюида. В работе (Shkalikov et al. 2006) исследования зависимости вязкости образцов нефти от концентрации асфальтеновых соединений показали, что состав нефти влияет на ее реологические свойства. Вопрос оценки группового состава углеводородов методом ЯМР-релаксометрии обсуждается во многих статьях, например, в работе (Mirotechnik et al. 2001) предложена экспериментальная методика оценки соотношения ароматических, насыщенных, смолистых и асфальтеновых соединений.

Время ЯМР-эксперимента составляет от единицы секунда до десятки минут, поэтому данный метод может быть эффективно использован для экспресс-оценок реологических свойств и состава углеводородов (Turakhanov et al. 2016) как в лаборатории, так и непосредственно при бурении скважины или её эксплуатации. Лабораторное ЯМР-изучение углеводородов является важным для установления их релаксационных характеристик, необходимых при интерпретации данных ядерно-магнитного каротажа (ЯМК).

Настоящая работа посвящена развитию лабораторной ЯМР-релаксометрии применительно к экспресс-изучению группового состава и реологических свойств жидких углеводородов.

Объекты и методы исследования

Выполнено ЯМР-исследование более 90 образцов нефтесодержащих флюидов, включая образцы нефти с вязкостью от 1 до 180 мПа*с (при 20°C), нефтяного конденсата с фракциями, кипящими при температуре ниже и выше 200°C, а также образцов битуменов, экстрагированных из нефтенасыщенных пород. По результатам исследований выполнен сопоставительный анализ с групповым составом и реологическими характеристиками, измеренными стандартными методами в геохимической лаборатории.

ЯМР-измерения проведены на релаксometре «МСТ-05» с индукцией магнитного поля 55 мТл и рабочей частотой 2,2 МГц при температуре 25°C. Система постоянных магнитов релаксometра выполнена на основе самарий-кобальтового сплава с рабочим температурным диапазоном от -60°C до +350°C. В эксперименте используется импульсная последовательность Карра-Парселла-Мейбума-Гилла с регистрацией сигнала спинового эха.

Оценка группового состава и реологических свойств углеводородов

В качестве параметра, характеризующего T_2 спектр, широко используется среднее логарифмическое значение T_2^{LM} , которое вычисляется следующим образом:

$$T_2^{LM} = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i T_{2i}}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}\right), \quad (1)$$

где T_{2i} – время релаксации для i -й компоненты, α_i – доля i -й компоненты в T_2 спектре.

С целью изучения возможностей ЯМР-релаксометрии применительно к групповому анализу и оценке реологических свойств проведены ЯМР-измерения реальных образцов нефти, конденсатов и битумоидов нефтесодержащего керосина с ряда месторождений Западной Сибири. Выполнено сопоставление ЯМР-характеристик с реологическими свойствами углеводородов, а также их групповым составом (табл. 1). Классификация нефти в таблицах выполнена в соответствии с ГОСТ Р 51858-2002 «Нефть. Общие технические условия».

Тип	T_2 , мс	Динамическая вязкость (20°C), мПа*с	Групповой состав, %			
			Асфальтены	Смола	Аром. УВ	Насыщ. УВ
К	995	1	- (< 1)	- (2)	22 (20)	78 (77)
ОЛН	543	2	2 (< 1)	6 (6)	16 (19)	76 (74)
ЛН	108	8	3 (1)	4 (8)	23 (23)	70 (68)
СН	140	7	4 (3)	13 (13)	34 (39)	49 (45)
ПН	16	50	9 (8)	15 (27)	29 (31)	47 (34)
БН	11	68	- (1)	23 (19)	42 (38)	35 (42)
Б	4	180	- (4)	- (30)	50 (31)	50 (35)

Таблица 1 Результаты ЯМР и стандартных лабораторных измерений группового состава и реологических свойств углеводородов. К – конденсат, ОЛН – особо легкая нефть, ЛН – легкая нефть, СН – средняя нефть, ПН – тяжелая нефть, БН – битуминозная нефть, Б – битумоид. В скобках указаны значения, установленные стандартными лабораторными методами.

Из данных табл. 1 видно, что T_2^{LM} , описываемое (1), хорошо коррелирует именно с коэффициентом динамической вязкости. По результатам исследований получено следующее уравнение, связывающее коэффициент вязкости с T_2^{LM} :

$$\eta = \alpha T \left(\frac{1}{T_2^{LM}} \right)^\beta, \quad (2)$$

где η – коэффициент динамической вязкости (мПа*с), T – температура, при которой проводятся измерения (°К), T_2^{LM} – среднее T_2 (мс), константы $\alpha=2.31$ и $\beta=0.95$. Формула (2) получена в результате аппроксимации экспериментальных данных с коэффициентом корреляции 0,85. Таким образом, предложено уравнение для расчета коэффициента динамической вязкости на основе данных ЯМР.

Что касается возможности определения группового состава, то из данных, приведенных в табл. 1 видно, что наблюдается четкая корреляция между результатами стандартных методов и ЯМР-измерений. Отсутствие ЯМР-оценок концентрации смолисто-асфальтеновых соединений в образцах конденсата связано с тем, что для регистрации сигнала от конденсата на ЯМР-релаксометре «МСТ-05» необходимо время между эхо-импульсами, сравнимое с временем T_2 , характерным для смол и асфальтенов. За это время ядра атомов водорода в данных соединениях успевают срелаксировать и не дают вклад в ЯМР-сигнал. На примере образцов особо легкой, легкой и средней нефти видно, что погрешность определения группового состава не превосходит 5%. Это обуславливает возможность использования метода ЯМР-

релаксометрии для экспресс-оценки состава углеводорода. Что касается образцов тяжелой, битуминозной нефти и экстрагированного битумоиды, то наблюдается ухудшение корреляции, что объясняется большой долей смолисто-асфальтеновых соединений.

Данные из табл. 1 подтверждают тот факт, что повышение вязкости связано с наличием смол-асфальтеновых составляющих. Увеличение вязкости углеводородов приводит к смещению спектра T_2 в область «мертвого» времени прибора, а значит и понижению точности результатов, так как наиболее быстро релаксирующие компоненты не могут быть зарегистрированы с высокой точностью.

На ряду с этим, для обоснования возможности анализа группового состава выполнены ЯМР-измерения образцов смеси бензола и петролейного эфира при различном их соотношении, в том числе в зависимости от температуры. Выбор соединений обусловлен тем, что петролейный эфир представляет собой смесь легких предельных алканов – пентанов и гексанов. Бензол – представитель ароматического ряда. Для эксперимента с модельными образцами были подготовлены 11 проб: 100% бензол, 100% петролейный эфир, а также 9 образцов смеси бензол/петролейный эфир в пропорциях от 10% до 90% с шагом 10%. В результате обработки полученных данных, установлена зависимость среднего T_2^{LM} смеси от температуры и концентрации бензола (рис. 1).

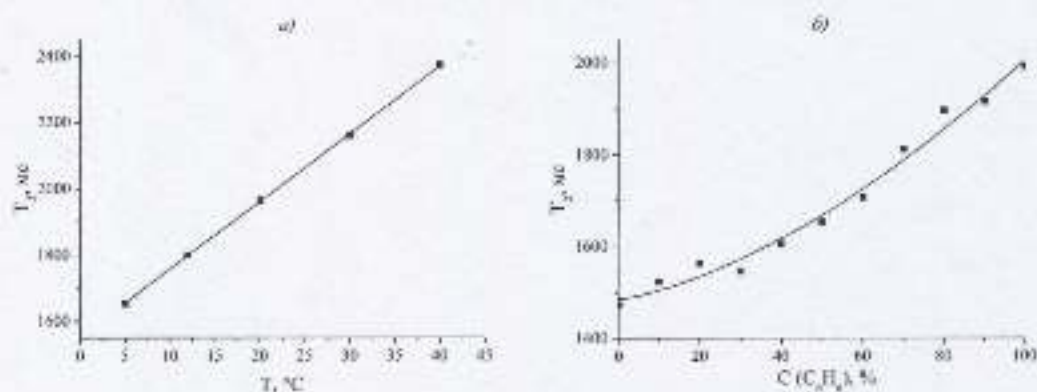


Рисунок 1 Зависимости среднего T_2^{LM} смеси бензол-петролейный эфир: в соотношении 1:1 от температуры (а), от концентрации бензола при 20°C (б).

На рис. 1а приведена зависимость среднего T_2^{LM} от температуры: от 5°C до 40°C с шагом 7°C при соотношении 1:1 смеси бензола и петролейного эфира. Зависимость подчиняется линейному закону, что подтверждает полученное ранее уравнение (2).

На рис. 1б представлена зависимость среднего T_2^{LM} смеси от концентрации бензола при температуре 20°C. Видно, что данная зависимость подчиняется гиперболическому закону:

$$\frac{1}{T_2^{LM}} = \sum_{i=1}^P C_i \frac{1}{T_{2i}}, \quad (3)$$

где C_i – концентрация i -го соединения, T_{2i} – характерное T_2 i -го соединения, P – общее число соединений, составляющих данный углеводород.

Из рис. 1б и уравнения (3) видно, что характерные времена T_2 насыщенных и ароматических соединений отличаются, а среднее T_2^{LM} смеси обратно пропорционально концентрации компонент. Таким образом, можно сделать вывод, что групповой анализ можно проводить на основе ЯМР-данных.

Точные оценки определения соотношения ароматические и насыщенные углеводороды, определяемые по ЯМР-данным, подтверждаются и результатами численного моделирования ЯМР-откликов и анализом дискретного ЯМР-спектра.

В целом, лабораторный метод ЯМР-релаксометрии демонстрирует высокую оперативность измерений и информативность получаемых результатов применительно к изучению реологических свойств и оценке группового состава углеводородов.

Выводы

Таким образом, в работе экспериментально установлено, что время релаксации углеводородов T_2^{NM} хорошо коррелирует с его вязкостью. Для описания выявленной зависимости предложено уравнение связи среднего T_2^{NM} с коэффициентом динамической вязкости. Показаны возможности определения группового состава углеводородов на основе данных ЯМР-релаксометрии. Проведены эксперименты на модельных образцах и численное моделирование, которые указывают на обоснованность оценок группового состава углеводородов. В дальнейшем необходимо совершенствовать как методику обработки данных для уменьшения погрешности, обусловленной математическими приемами обработки ЯМР-сигнала, так и экспериментальную установку, повышая величину и однородность поля.

Библиография

Заришов, Т., Дорогиницкий, М., Гизатуллин, Б., Абдуллин, Т., Мусин, К., Мурзакаев, В. [2015] Результаты изучения вязкости нефти с месторождений республики Татарстан с помощью метода Ядерной магнитно-резонансной релаксометрии. *Каротажник*, **253**, 3-13.

Freedman, R., Heaton, N., [2004] Fluid characterization using nuclear magnetic resonance logging. *Petrophysics*, **45**, 241-250.

Hursan, G., Seifert, D., Lyngra, S., Palmer, R. [2016] Oil viscosity estimation from NMR logs for in-situ heavy oil characterization. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dubai*, SPE-181600-MS.

Kausik, R., Fellah, K., Feng, L., Freed, D., Simpson, G. [2016] High- and Low-Field NMR Relaxometry and Diffusometry of the Bakken Petroleum System. *SPWLA 57th Annual Logging Symposium, Reykjavik*, SPWLA-2016-SSS.

Kurb, J., Vorapalawat, N., Nicot, B., Bryant, R. [2015] Relation and Correlation between NMR Relaxation Times, Diffusion Coefficients, and Viscosity of Heavy Crude Oils. *The Journal of Physical Chemistry*, **119**(43), 24439-24446.

Mirzochnik, K., Kantzas, A., Starosud, A., Aikman, M. [2001] A New method for group analysis of petroleum fractions in unconsolidated porous media. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, **40**, 38-44.

Shkalikov, N., Skárda, V., Archipov, R. [2006] Solid-like component in the spin-spin NMR-relaxation of heavy oils. *Magnetic Resonance in Solids. Electronic Journal*, **8**, 38-42.

Tyvakhanov, A., Shumskaya, M., Glinskikh, V., Fursenko, E. [2016] NMR relaxometry potential for oil rheological properties evaluation and component composition determination. *Proceedings of the 8th International Siberian early career geoscientists conference, Novosibirsk*, 334-335.