

Экспресс-методы ПМР-релаксометрии определения вязкости и концентрации асфальтенов в нефтях

*Кашаев Р.С., Киен Н.Т., Тунг Ч.В., Козелков О.В.

*Казанский государственный энергетический университет,
420066, Казань, ул. Красносельская, 55, каф. ПМ, kashaev2007@yandex.ru*

Дата поступления статьи ____ апреля 2019 г.

Аннотация Методом протонной магнитной резонансной релаксометрии (ПМРР) исследованы зависимости времен спин-решеточной и спин-спиновой релаксации $T_{1,2}$ и установлены их зависимости от вязкости и асфальтенов+смола нефтей, в частности месторождения Вах Но (СП Вьетсовпетро). Уточнена корреляция $\eta T_{1,2} = \text{const}/T$ для характеристики вязких и асфальтеновых нефтей. Сделан вывод, что вязкость $\nu = \eta/\rho$ в данных нефтях экспоненциально пропорциональна концентрации асфальтенов+смола. Выведены уравнения, связывающие вязкость и концентрацию асфальтенов+смола с параметрами ПМР-релаксации.

Ключевые слова: релаксация, вязкость, концентрация асфальтенов, корреляция $\eta T_{1,2} = \text{const}/T$, параметры ПМР.

Введение

Метод протонной магнитной резонансной релаксометрии (ПМРР) еще не нашел широкого применения в промышленности для анализа веществ и материалов, хотя контроль параметров технологического процесса – важнейший инструмент управления. Это особенно ощущается в нефтедобывающей и химической промышленности, которая испытывает потребность в датчиках и приборах, которые могут контролировать параметры качества нефти, многофазных жидкостей и органических смесей, не разделяя их на фазы и не используя реактивов. Так, по ГОСТ 8.615-2005 [1] требуется оперативный контроль расхода, концентрации воды, газа и плотности добытой скважинной жидкости (СКЖ). Но погрешность измерения для высокообводненных нефтей с использованием существующих промышленных датчиков может достигать 15% [2], в то время, как при «бригадном учете» на промыслах требуется, чтобы точность была не хуже 2-3 %.

ПМРР является, пожалуй, единственным экспресс-методом, способным одновременно контролировать в сырой нефти многие ее параметры во всем диапазоне их изменений [3]. К преимуществам ПМРР относятся: универсальность и неразрушающий метод контроля, отсутствие контакта с исследуемой жидкостью и, следовательно,

отсутствие разрушающего действия агрессивных сред на оборудование; большое число контролируемых параметров и показателей - скорости потока ν (общей и покомпонентной), вязкости ν (в диапазоне 1-600 мм²/с), плотности ρ (в диапазоне 400-1100 кг/м³), концентрации воды W (в диапазоне 0-98%), парафина P , асфальтенов $Acф$ и смол $См$ (в диапазоне 0-20 %), газонасыщенности G , содержание водорода H (0-100%), фазового состава. Важным является отсутствие потребности в расходных материалах; минимальное техническое обслуживание и отсутствие движущихся деталей; обеспечение взрыво-, токсической и пожарной безопасности.

Добыча, подготовка и транспортировка вязкой нефти с высоким содержанием парафина, особенно с морских месторождений, сложна и затратна. Поэтому анализ ее физико-химических свойств (ФХС), в частности вязкости и концентраций P и $AcфСмол$ важна для решения проблем, связанных с добычей и транспортировкой. Кылулонгский бассейн (Вьетнам), разрабатываемый совместным предприятием ВьетСовПетро, включает месторождения, крупнейшее из которых Вах Но (Белый тигр). По данным сейсморазведочных работ Горюнов [4], некоторые нефти данного месторождения имеют кинематическую вязкость, достигающую $\nu_{50} = 27.6$ мм²/с, содержат парафина до $P = 28.3\%$, $AcфСмол = 14 \%$, и при комнатных температурах представляют собой ваксоподобное вещество. Это ведет к образованию асфальто-смолисто-парафиновых отложений (АСПО) в скважинных трубах, трубопроводах и сложностям при ее транспортировке и подготовке.

Целью работы является изучение протонных магнитно-резонансных (ПМР) параметров нефтей Вах Но для определения причин их экстремальных ФХС и разработка экспресс-методов их контроля для принятия решений по способам обработки нефтей.

Эксперимент

Образцы, аппаратура и методики измерения

В зависимости от месторождений нефтей Вьетсовпетро наблюдается существенная разница в их ФХС (Табл.1). Для сравнительного анализа нами исследованы три образца месторождения Вах Но №4, №3 и №2, существенно отличающиеся по плотности ρ , вязкости ν_{50} и ν_{70} , концентрациям парафинов P и асфальтенов $Acф$.

По результатам определения углеводородного (УВ) состава нефти образца №4 месторождения Вах Но методом D2892/D5236 [5] в нефти содержится в массовых %: н-

парафинов - 42.66; изо-парафинов - 33.43; нафтенов 20.44, ароматики 3.46%, причем парафины представлены в основном легкими молекулами в узком диапазоне числа углеродных атомов C₄-C₈, циклопарафины – в диапазоне чисел C₅- C₇ и бензола C₆.

ФХС сырой нефти на месторождениях Вьетсовпетро Таблица 1.

Свойства	Месторождение				
	№4	№3 ВК-8	№2 MSP-10	Gau trang	Trang
Плотность 20 °С, ρ(г/см ³)	0,8519	0,8678	0,879	0,8735	0,8315
Температура конденсации нефти, T _{конд} (°С)	35,5	34,5	38,5	34,4	28,7
Вязкость кинематическая, ν (мм ² /с):					
- при 50 °С	12,83	14,67	27,57	21,72	5,67
- при 70 °С	6,60	7,66	16,62	11,19	3,44
Вязкость динамическая, η = νρ (мПа·с):					
- при 50 °С	10,92	12,73	24,23	18,97	4,71
- при 70 °С	5,60	6,65	14,61	9,77	2,86
Содерж. парафина, П(%)	26,00	21,2	28,3	23,75	20,68
Темп.плав парафина, °С	58,7	58,9	60,5	59,5	58,7
Содерж. Асф.Смол,%	7,21	9,06	14,04	11,53	4,04
Содержание серы, %	0.039-0.084	0.1	0.1	-	-
Молекулярный вес, а.е.м.	257.7 – 295.7	285.9	362.1	-	-

Для решения поставленной цели работы использовался разработанный нами по ТУ 25-4823764.0031-90 и изготовленный в Конструкторском бюро резонансных комплексов - портативный переносной, с питанием от аккумулятора релаксометр ПМП-NP1 [6] (рис.1).

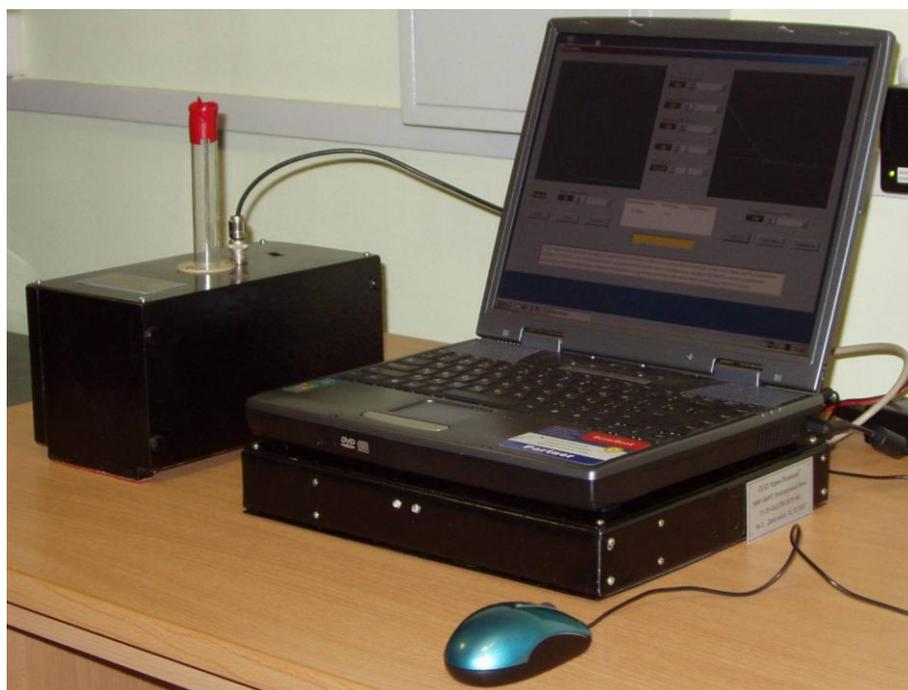


Рис.1. Портативный переносной, с питанием от аккумулятора релаксометр ПМП-NP2

Технические характеристики ПМР-NP2 в сравнении с лабораторными аналогами (портативных нет) приведены в Таблице 1.

Технические характеристики ПМР-NP2

Таблица 1.

Технические параметры	Портативный Релаксометр ПМР NP-2 (КБРК, Казань)	Релаксометр ЯМР 08/РС (КБ РК, Казань)	Minispec Pc120 (Bruker, ФРГ)	UNIX ST 500 (UNIX Instr.)
Отн. ошибка измерений времен релаксации/амплитуд спин-эхо, %	3/2	4/2	3	3
Критерий $K = \nu_0^2 V$, МГц ² ·см ³	2700 - 4150	1344	1600- 6400	1070
Резонансная частота, МГц	14.32	5 – 8	10 – 40	5-25
Диаметр ампулы датчика, мм	10-30	30	10- 40	10-35
Питание:	=12 В, ≈220В	≈220 В	≈220 В	≈220 В
Потребляемая мощность, ВА	15	60	300	40
Габариты: Электронного блока, см	4x25x30	32x20x39	106x54x43	45x25x45
Магнита, см	20x15x10	20x15x10	106x54x43	15x17x15
Масса, кг	< 18	20	80	17

Критерий K , по которому оценивается амплитуда сигнала ЯМР на фоне шумов приемника, для портативного релаксометра ПМР составляет $K = \nu_0^2 D^3$ [МГц²·см³] = 2700 – 4150 МГц²·см³, где ν – резонансная частота, D – диаметр датчика (высота катушки датчика равнялась диаметру). Правомочность оценки по критерию K вытекает из отношения сигнал/шум (S/N) в приемном тракте [7]:

$$S/N = 4\pi s n \omega_0 M_0 Q \eta \cdot 10^{-2} / 1,2 \cdot 10^{-6} (Z_0 \cdot \Delta \nu \cdot F)^{1/2} \quad (1)$$

где s – площадь витков приемной катушки, n – число витков, $\omega_0 = 2\pi\nu_0$ – угловая резонансная частота, $M_0 = (I+1)N_0\mu^2 B_0 / 3kT$ – число спинов I в единице объема, N_0 – количество ядер в единице объема, μ – магнитный момент ядра, B_0 – индукция магнитного поля, k – постоянная Больцмана, T – температура в градусах Кельвина, Q – добротность контура приемной катушки, η – коэффициент заполнения катушки, Z_0 – сопротивление контура на частоте резонанса, $\Delta\nu$ – полоса пропускания и F – шум-фактор приемника.

При оценке амплитуды сигнала по критерию K релаксометр близок к зарубежному аналогу – ЯМР-релаксометру “Minispec pc120” (Bruker, ФРГ). Минимальный интервал между импульсами $\tau = 100$ мксек, максимальное количество импульсов $N = 10000$, число накоплений – до $n = 100$. Задание параметров импульсных последовательностей осуществляется через клавиатуру Ноутбук и высвечивается на мониторе. Время измерения в среднем не более 2 минут.

По показателю чувствительности $K = \nu_0^2 D^2 [10^6 \cdot \Gamma \text{ц}^2 \text{м}^2] = 2285 \text{ МГц}^2 \text{см}^3$ релаксометр ПМР-*NP1* близок к зарубежному аналогу *Minispecpc120*.

Термостатирование образца осуществлялось в датчике ПМР [8], отличающемся малым температурным градиентом и низким уровнем электромагнитных шумов. В датчике термоэлементы на эффекте Пельтье, в зависимости от направления тока охлаждали или нагревали образец в диапазоне $-15^\circ \div +100^\circ \text{C}$ с точностью $\pm 0.5^\circ \text{C}$.

В методе ПМР-релаксометрии зависимости огибающей амплитуд A_e спин-эхо, как правило, являются много экспоненциальными и описываются уравнениями:

$$A_e = 1 - A_0 \sum [P_{1i} \exp(-t/T_{1i})] \quad (1)$$

$$A_e = A_0 \sum [P_{2i} \exp(-t/T_{2i})] \quad (2)$$

где A_0 соответствует суммарной амплитуде сигнала, P_{1i} и P_{2i} - относительному числу протонов с разной степенью молекулярной подвижности, соответствующим T_{1i} , T_{2i} - временам спин-решеточной и спин-спиновой релаксации протонных фаз $i = A, B, C$ с населенностями (концентрациями спинов в долях от единицы) P_{A_i} , P_{B_i} и P_{C_i} .

Определение T_{1i} осуществлялось по ур.(1) с использованием последовательности $90^\circ - \tau - 90^\circ - \tau_0 - 180^\circ$ Хана, где $\tau = 30-70$ мс, $\tau_0 = 300$ мкс; для определения T_{2i} использовалась многоимпульсная последовательность $90^\circ - \tau_1 - 180^\circ - 2\tau_1 - 180^\circ - 2\tau_1 - 180^\circ \dots$ Карра- Парселла-Мейбум-Гилла (см.[3]), где $\tau_1 = 300-500$ мкс, устраняющая влияние диффузии и неточности установки длительностей импульсов. Погрешность амплитуды ПМР-сигнала при 8-разрядном АЦП $\gamma_B = \pm 0,2\%$. Линейность детектора > 40 Дб. Погрешности однократных измерений времен релаксации составляли $\pm 3-4\%$, амплитудных $\pm 2\%$ и могли быть снижены в $(n)^{1/2}$ раз путем n накоплений амплитуд сигналов спин-эхо ПМР.

Определение ПМР-параметров осуществлялось путем построения огибающей в полулогарифмическом масштабе от времени и графоаналитического разделения полиэкспоненциальной огибающей на три компоненты (см. напр.[7]). После логарифмирования значений амплитуд спин-эхо через точки, при длинных временах лежащие на линейную зависимость, проводится прямая, в полулогарифмическом масштабе, описываемая уравнением $\ln(A_t/A_0) = -t/T_{2i} + \ln A_i$. Путем последовательного вычитания из экспериментальных точек данной и последующих прямых, соответствующих компонентам, последовательно получают $T_{1,2i}$ и $A_0 P_{1,2i}$ для протонных фаз. За постоянную $T_{1,2i}$ для каждой прямой принимается время, в течение которого амплитуда сигнала спин-эхо уменьшается в e раз. Огибающие разлагались на три компоненты $i = A, B, C$ при различии времен релаксации в 4-10 раз.

Исследования нефтей Вьетсовпетро стандартными методами

На рис. 2 представлены зависимости кинематических вязкостей ν_{50} (мм²/с) при 50 °С (кривая 1) ν_{70} (мм²/с) при 70°С (кривая 2) нефтей Вьетсовпетро от концентрации парафина Π . Ломаные кривые 3, 4 – ν_{50} и ν_{70} для образцов №3, 4 и 2.

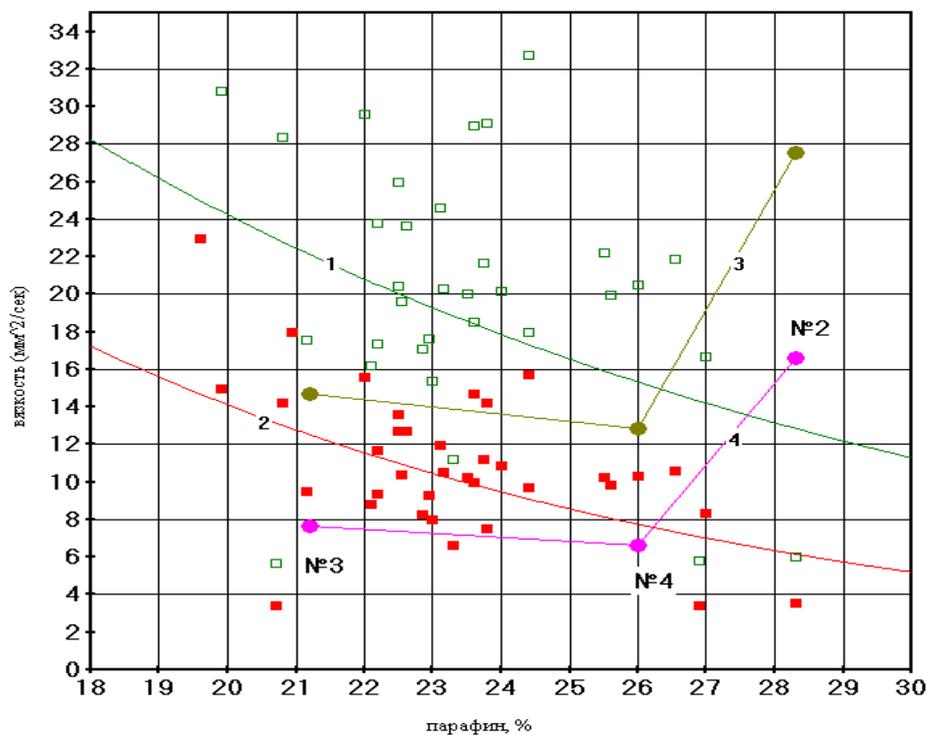


Рис.2. Зависимости кинематических вязкостей ν_{50} (мм²/с) при 50 °С (кривая 1) ν_{70} (мм²/с) при 70°С (кривая 2) нефтей Вьетсовпетро от концентрации парафина Π , ломаные кривые 3, 4 – ν_{50} и ν_{70} для исследованных образцов №3, 4 и 2.

Как это видно из рис.2, зависимость вязкостей ν_{50} и ν_{70} от парафина для всего массива нефтей при большом разбросе значений (коэффициент корреляции $R^2 < 0.2$) носит сложный характер и имеет тенденцию к снижению с ростом Π . Это аномально и не вписывается в существующие теории вязкости.

Зависимости вязкости ν_{50} и ν_{70} от $Ac\phi C_{mol}$ представлены на рис.3.

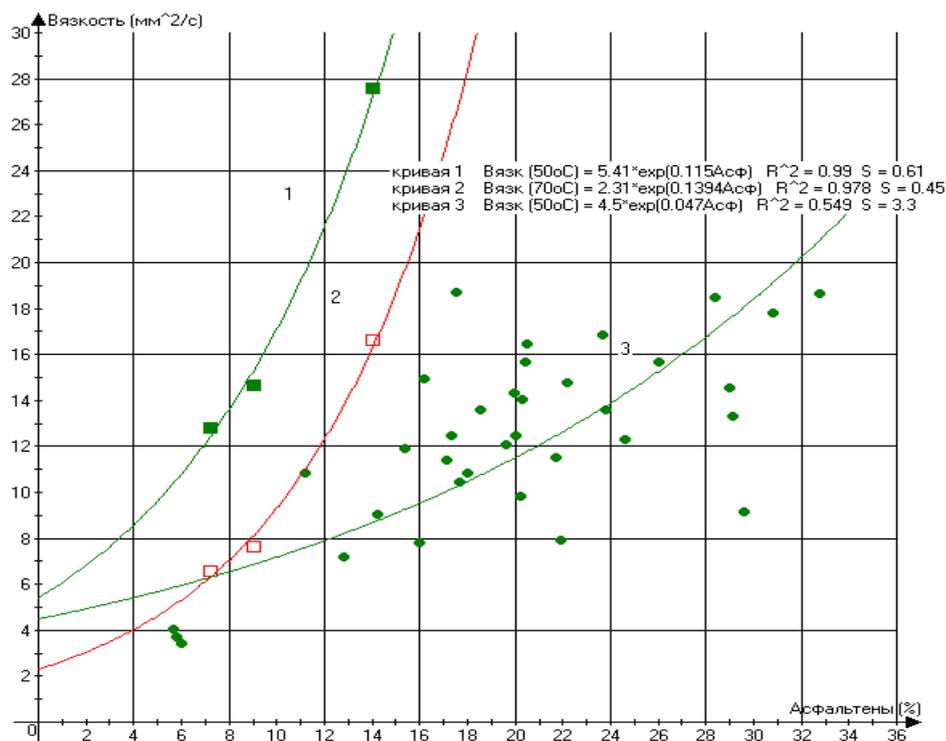


Рис.3. Зависимости кинематических вязкостей ν (мм²/с) нефтей №4, 3 и 2 при 50 °С (кривая 1) и 70°С (кривая 2) от концентрации $АсфСм$ на фоне вязкостей ν (мм²/с) нефтей Вьетсовпетро при 50 °С (кривая 3)

Зависимости кинематических вязкостей ν (мм²/с) нефтей №4, 3 и 2 при 50 °С и 70°С от концентрации $АсфСм$ описываются с коэффициентами корреляции $R^2 = 0.98$ и среднеквадратической ошибкой $S = 0.5$ уравнениями:

$$\nu_{50}(\text{мм}^2/\text{с}) = 5.41 \exp(0.115 АсфСм) \quad \text{при } 50^\circ\text{С} \quad (3)$$

$$\nu_{70}(\text{мм}^2/\text{с}) = 2.31 \exp(0.1394 АсфСм) \quad \text{при } 70^\circ\text{С} \quad (4)$$

В то время, как вязкости ν_{50} (мм²/с) для всего массива нефтей Вьетсовпетро описываются с коэффициентом корреляции $R^2 = 0.549$ и $S = 3.3$ уравнением:

$$\nu_{50}(\text{мм}^2/\text{с}) = 4.5 \exp(0.047 АсфСм) \quad (5)$$

Из рис.3 и ур.(3-5) видно, что ν_{50} и ν_{70} экспоненциально пропорциональна $АсфСм$.

Исследования нефтей Вьетсовпетро методами протонной магнитной резонансной релаксометрии

Полученные выше данные требуют дальнейших исследований, в том числе квантомеханическим методом ПМР-релаксометрии. Возможно, на поведении ФХС сказывается температура?

Как это отмечено в [9], по исследованиям n-парафинов, в работе [10] с точностью $\pm 2\%$ при температуре 295°C впервые была получена корреляция между вязкостью, временами спин-решеточной релаксации T_1 и температурой T :

$$T_1 = (2.712/\eta)(T/298) = (2.712/\nu\rho)(T/298) \quad (7)$$

Такая зависимость вытекает из зависимости скоростей $R_{1,2}$ протонной релаксации [11], состоящей из двух вкладов – внутримолекулярного и межмолекулярного:

$$(T_{1,2})^{-1} = 3\gamma^4 h^2 \tau_R / 8\pi^2 \sum r_{ij}^{-6} + \pi\gamma^4 h^2 N_I \tau_D (1 + 2a_o/5D\tau_D) / 4a_o^3 \quad (8)$$

где $\gamma/2\pi = 4256$ рад/с·гс – гиромагнитное отношение, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж/с – постоянная Планка, $N_I = 6,75 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ – число спинов в см^3 , a_o – средний молекулярный диаметр, r_{ij} – среднее межпротонное расстояние, τ_R и τ_D – времена корреляции вращательного и трансляционного движений ($\tau_D = a_o/12D$), D – коэффициент самодиффузии и Аррениусова характера зависимости времен корреляции τ_R и τ_D от температуры T :

$$\tau_c = \tau_o \exp(E_A/k_B T), \quad (9)$$

где E_A – средняя энергия активации молекулярного движения, k_B – константа Больцмана, $\tau_o = 1/\nu_o$ – предэкспоненциальный множитель, $\nu_o = \tau_o^{-1}$ соответствует вибрационной частоте колебаний атомов между скачками. В высокотемпературном приближении $2\pi\nu\tau_R \ll 1$ можно учитывать только $(T_{2i})^{-1}$ от внутримолекулярного движения цепей и диполь-дипольного взаимодействия ассоциатов. Тогда, учитывая, что $\eta = \nu\rho = B T \exp(E_A/RT)$, где B – постоянная, и подставив ур.(9) в ур.(8) получим:

$$\eta T_{1,2}/T = \nu\rho T_{1,2}/T = \text{const} / \sum r_{ij}^{-6} \quad (10)$$

т.е. постоянство r_{ij} должно приводить к постоянству $\eta T_2/T = \text{const}$, что и подтверждается для УВ и легких нефтей [10]. Но при переходе к тяжелым асфальтовыми и парафинистым нефтям ур.(10) не выполняется, и наблюдаются зависимости скоростей релаксации $R_{1,2} = (T_{1,2i})^{-1}$ от $10^3/TK$ с увеличивающейся крутизной с понижением температуры [12], что свидетельствует об изменениях энергий активации E_{Ai} молекулярного движения.

Зарубежными нефтяниками был установлен т.н. «standard alkali-line» - стандартная $\eta T_{1,2}/T$ -корреляция для n-алканов. Но нефтяная промышленность нуждается в $\eta T_{1,2}/T$ - корреляциях в расширенном диапазоне ФХС для тяжелых, асфальтоновых и парафинистых нефтей. В то же время ощущается недостаток в фундаментальном понимании механизмов, управляющих молекулярной организацией нефтяных дисперсных систем при высоких вязкостях, концентрациях парафинов и асфальтонов.

Morris и др. [13] по анализу 66 образцов установили корреляцию для нефти в виде:

$$T_{1,2} = 1.2/\eta^{0.9} \quad \text{или} \quad \eta^{0.9} T_{1,2} = 1.2 \quad (11)$$

которая была модифицирована Vinegar [14] включением температуры T (в K):

$$T_{1,2} = (1.2/\eta)(T/298) \text{ или } \eta^{0.9}T_{1,2} = 1.2(T/298) \quad (12)$$

Zhang [15] отметили влияние на указанную корреляцию растворенного в нефти воздуха и ввели степень 0.9 не только в $\eta^{0.9}$, но и $(T/298)^{0.9}$. Lo [16] определил корреляцию для дегазированных живых нефтей в виде:

$$T_{1,2} = (2.848/\eta) (T/298) \quad (13)$$

По результатам наших исследований [17] корреляции $\eta T_{1,2A}/T$ описываются уравнениями:

$$T_{1A} = (1.07/\rho^{0.3}v^{0.3})(T/298) \text{ для } \eta = 0.7\div 6 \text{ мПа}\cdot\text{с} \quad (14)$$

$$T_{1A} = (2.78/\rho^{0.85}v^{0.85})(T/298) \text{ для } \eta = 6\div 60 \text{ мПа}\cdot\text{с} \quad (15)$$

$$T_{2A} = (0.68/\rho^{0.4}v^{0.4})(T/298) \text{ для } \eta = 0.7\div 6 \text{ сПа} \quad (16)$$

$$T_{2A} = (1.12/\rho^{0.8}v^{0.8})(T/298) \text{ для } \eta = 6\div 60 \text{ сПа} \quad (17)$$

Преобразуя ур.(15) и ур.(17) для высоких вязкостей получим зависимости $\eta(R_{1,2A})$ (рис.4):

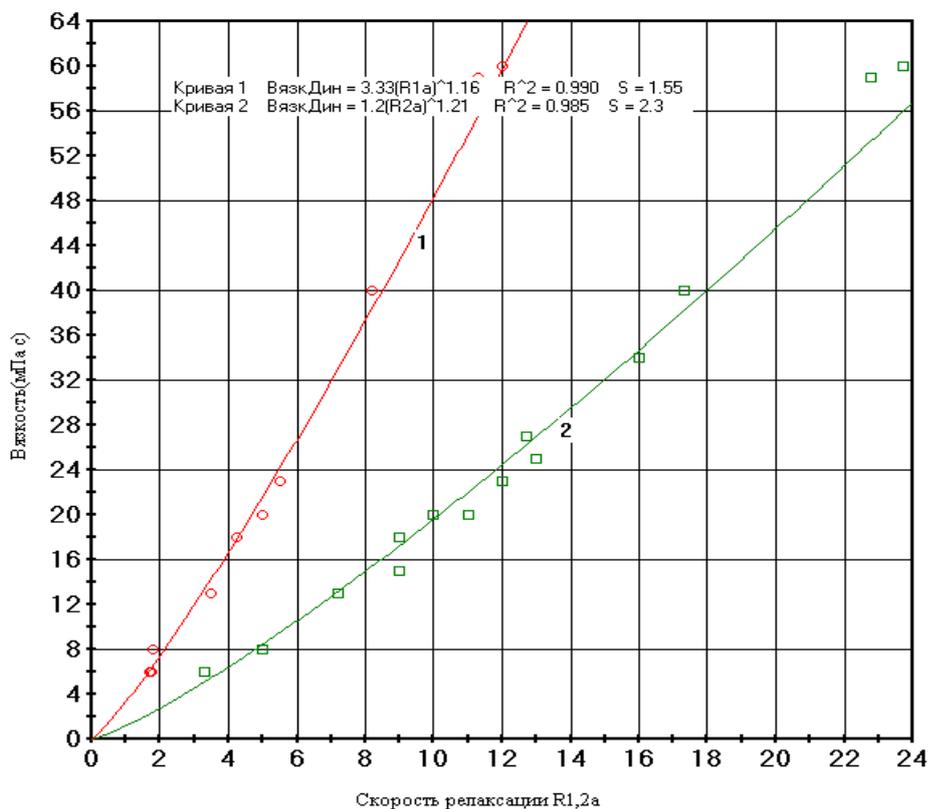


Рис.4.Прямые зависимости динамических вязкостей $\eta = \nu\rho$ от скоростей релаксации $\eta(R_{1A})$ – кривая 1, $\eta(R_{2A})$ – кривая 2.

Или с учетом $\nu = \eta/\rho$, с $R^2 = 0.99$ $S = 2$ имеем простые уравнения для $\nu(R_{1,2A})$:

$$\nu = (3.33/\rho)(R_{1A})^{1.16} \quad (18)$$

$$\nu = (1.2/\rho)(R_{2A})^{1.21} \quad (19)$$

На рис.5. представлены зависимости концентраций $As\phi$ от измеренных времен $T_{1,2A}$ для нефтей Поволжья и Зап.Сибири (для образцов №2-4 Вах Но приведены данные $As\phi + C_{мол}$, поэтому они имеют завышенные значения – отдельные точки • кривой 3).

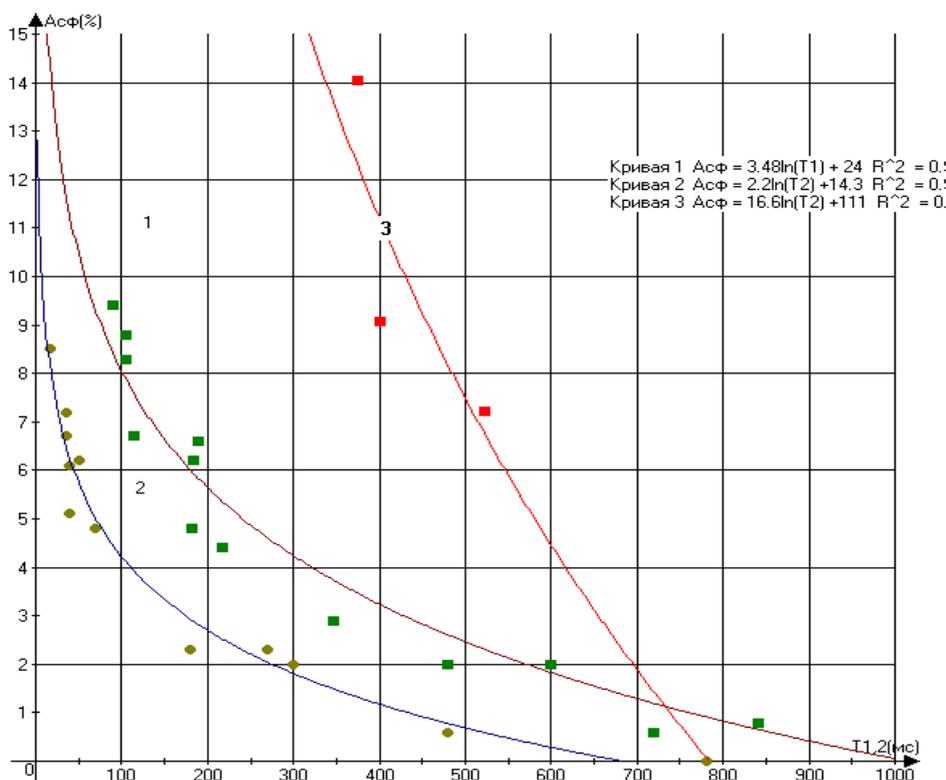


Рис.5. Зависимости концентраций $As\phi$ от измеренных времен $T_{1,2A}$ (кривые 1 и 2) для нефтей Поволжья и Зап.Сибири (для образцов №2-4 Вах Но приведены данные $As\phi + C_{мол}$, поэтому они имеют завышенные значения – отдельные точки • кривой 3).

Они коэффициентами корреляции $R^2 = 0.956$ и $S = 0.7$ описываются уравнениями:

$$As\phi = 3.48\ln(T_{1A}) + 24 \quad (20)$$

$$As\phi = 2.2\ln(T_{2A}) + 14.3 \quad (21)$$

$$As\phi + C_{мол} = 16.6\ln(T_{2A}) + 111 \quad (22)$$

Уравнения (18-22) могут быть использованы в качестве экспресс-метода определения вязкости и асфальтенов в нефти в процессе ее добычи и транспортировки.

Заключение и выводы

1. Методами протонной магнитной резонансной релаксометрии исследованы образцы №4 и №2 MSP-10 месторождения Вах Но, существенно отличающиеся по вязкости, плотности, концентрациями парафинов и асфальтенов от отечественных нефтей.
2. Установлено, что на вязкость существенно влияет концентрация асфальтенов в нефти.
3. Установлено, что корреляции «вязкость-релаксация» для нефтей не могут быть интерпретированы по «вязкостному стандарту» и сделано уточнение для вязких нефтей.

4. Получены корреляции между вязкостью и концентрацией асфальтенов от скоростей и времен ПМР-релаксации.

Литература

1. ГОСТ 8.615-2005 «Государственная система обеспечения единства измерений. Общие метрологические требования».
2. Scott S.L. // *The American Oil & Gas Reporter*. - 2001. pp. 68-73.
3. Кашаев Р.С. Аппаратура и методики ЯМР-анализа нефтяных дисперсных систем. Lambert Academic publishing (LAP). GmbH&Co.KG, Saarbrücken, Germany, 2012. – 92 с.
4. Горюнов Е.Ю., Нгуен М.Х.. Закономерности строения месторождений нефти и газа в фундаменте Кылулонгского бассейна (Вьетнам). // *Нефть Газ*. Москва, -2018. 4(64). С.18.
5. Quang Ngai. Crude Oil Assays Report # 02/2016. Bach Ho Crude Oil. Viet Nam National Oil and Gas Group "Binh Son Refining& Petrochemical Co., Ltd". -2016.
6. Патент РФ № 67719 РФ. Портативный релаксометр ЯМР G01N24/08 / Идиятуллин З.Ш., Кашаев Р.С., Темников А.Н. от 25.06.2007 г.
7. Чижик В.И. Ядерная магнитная релаксация. С-Пб. Изд. С-П. Университета. 2004. -388 с.
8. Патент РФ № 2319138. Р.С. Кашаев, З.Ш.Идиятуллин, А.Н.Темников. Бюлл. №7. -2008.
9. Shikhof I., Arns C.H.// *Appl. Magn. Res.* 47: 1391. -2016. Doi:10.1007/s00723-016-0830-4.
10. Kashaev S.-H.G., Le B., Zinyatov M.Z.//*Translation from Doklady Akademii Nauk SSSR* 157(6). 1438. -1964.
11. Вашман А.А., Пронин И.С., Ядерная магнитная релаксация и ее применение в химической физике, Наука. М.: 1979. - 235 с.
12. Кашаев Р.С. Научные основы структурно-динамического анализа НДС методом ЯМР. Автореф. дисс. ...докт. техн.наук, М.: ИГИ РАН, 2001. - 268 с.
13. Morris C., Freedman R., Straley C., Johnson M., Vinegar H., Tutunjian P.//*SPWLA 35-th Annual Logging Symposium*, 1. -1994.
14. Vinegar H., in *Nuclear Magnetic Resonance Logging Short Course Notes*, ed. By Georgi D.T.// *36-th Annual Logging Symposium*.1. -1995.
15. Zhang Q., Lo S.-W., Huang C.C., Hirasaki G.J., Kabayashi R., House W.V. // *39-th Annual Logging Symposium*, 1. -1998.
16. Lo S.-W., Dissertation, Rice University. -2002.
17. Kashaev R.S. // *Appl. Magnet. Resonance*, 49. 309. -2018. <https://doi.org/10.1007/s00723-018-0977-2>

Авторская справка

Кашаев Рустем Султанхамитович, д.т.н., профессор каф. Приборостроение и мехатроника Казанского государственного энергетического университета, 420066, Казань, Красносельская, 51, с.т. 8-904-7158012, kashaev2007@yandex.ru

Киен Нгуен Тиен, аспирант проф.Кашаева Р.С., каф. Приборостроение и мехатроника, Казанского государственного энергетического университета, 420066, Казань, ул. Красносельская, 51, с.т. 8-904-7158012, kashaev2007@yandex.ru

Тунг Чан Ван, аспирант проф.Кашаева Р.С., каф. Приборостроение и мехатроника Казанского государственного энергетического университета, 420066, Казань, ул. Красносельская, 51, с.т. 8-904-7158012, kashaev2007@yandex.ru

Козелков Олег Владимирович, доцент кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанского государственного энергетического университета, 420066, Казань, ул. Красносельская, 51, сот.тел. 89047621007, эл. Почта ok.1972@list.ru

Справка

Статья не послана в другие журналы

Проф. Кашаев Р.С.

25.04.2019