

## ЭКСПРЕСС-МЕТОДЫ ПРОТОННОЙ МАГНИТНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ РЕЛАКСОМЕТРИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЯЗКОСТИ И КОНЦЕНТРАЦИИ АСФАЛЬТЕНОВ В НЕФТЯХ

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

УДК 539.551;665.6

Казанский государственный энергетический университет,  
420066, Казань, ул. Красносельская, 55, Россия; e-mail: kashaev2007@yandex.ru

(Поступила 25 апреля 2019)

Методом протонной магнитной резонансной релаксометрии исследованы зависимости времен спин-решеточной и спин-спиновой релаксации  $T_{1,2}$  от вязкости и концентрации асфальтенов+смола нефтей, в частности, месторождения Вах Но (СП “Вьетсовпетро”) и выведены связывающие их уравнения. Уточнена корреляция  $\eta T_{1,2} = \text{const}/T$ . Вязкость  $\nu = \eta/\rho$  в данных нефтях экспоненциально пропорциональна концентрации асфальтенов+смола.

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

The spin-lattice and spin-spin relaxation times  $T_{1,2}$  depending on viscosity and concentration of asphaltenes+resins in oils have been studied using proton magnetic resonance relaxometry, in particular, for the Вах Но (JV “Vietsovpetro”) oil deposition, and the relating equations are deduced. The correlation  $\eta T_{1,2} = \text{const}/T$  has been refined. The viscosity  $\nu = \eta/\rho$  in these oils is exponentially proportional to the concentration of asphaltenes+resins.

**Keywords:** relaxation, viscosity, concentration of asphaltenes, correlation  $\eta T_{1,2} = \text{const}/T$ .

**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, способных 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. Однако погрешность измерения для высокообводненных нефтей с использованием существующих промышленных датчиков может достигать 15 % [2], в то время как при “бригадном учете” на промыслах требуется точность не хуже 2—3 %.

ПМРР — единственный экспресс-метод, способный 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  $\nu$  (общей и покомпонентной), вязкости  $\nu$  (в диапазоне 1—600 мм<sup>2</sup>/с), плотности  $\rho$  (в диапазоне 400—1100 кг/м<sup>3</sup>), концентрации воды (W) (в диапазоне 0—98 %), парафина (П), асфальтенов (Асф) и смола (См) (в диапазоне 0—20 %), газонасыщенности (G), содержания водорода H (0—100 %), фазового состава. Важно отсутствие потребности в расходных материалах, минимальное техническое обслуживание и отсутствие движущихся деталей, обеспечение взрыво-, токсической и пожарной безопасности.

---

## EXPRESS-METHODS OF PMR-RELAXOMETRY FOR DETERMINATION OF VISCOSITY AND CONCENTRATION OF ASPHALTENES IN OILS

R. S. Kashaev\*, N. C. Kien, T. V. Tung, O. V. Kozelkov (Kazan State Power Engineering University, 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, 420066, Russia; e-mail: kashaev2007@yandex.ru)

Добыча, подготовка и транспортировка вязкой нефти с высоким содержанием парафина, особенно с морских месторождений, сложны и затратны. Поэтому анализ ее физико-химических свойств, в частности вязкости и концентраций парафина, асфальтенов и смол, важен для решения проблем, связанных с добычей и транспортировкой. Кылулонгский бассейн (Вьетнам), разрабатываемый СП “Вьетсовпетро”, включает в себя месторождения, крупнейшее из которых Вах Но (“Белый тигр”). По данным [4], некоторые нефти данного месторождения имеют кинематическую вязкость, достигающую  $\nu_{50} = 27.6$  мм<sup>2</sup>/с, содержат парафина 28.3 %, асфальтенов и смол 14 % и при комнатной температуре представляют собой ваксоподобное вещество. Это ведет к образованию асфальтено-смолисто-парафиновых отложений в скважинных трубах и трубопроводах и осложняет ее транспортировку и подготовку.

Цель настоящей работы — изучение протонных магнитно-резонансных (ПМР) параметров нефтей Вах Но для определения причин их экстремальных физико-химических свойств и разработка экспресс-методов их контроля для принятия решений по способам обработки нефтей.

**Эксперимент.** В зависимости от месторождений нефтей “Вьетсовпетро” наблюдается существенная разница в их физико-химических свойствах (табл. 1). Исследованы три образца месторождения Вах Но № 4, 3 и 2, существенно отличающиеся плотностью  $\rho$ , вязкостью  $\nu_{50}$  и  $\nu_{70}$ , концентрациями парафинов и асфальтенов от общего массива образцов нефтей.

**Т а б л и ц а 1. Физико-химические свойства сырой нефти на месторождениях “Вьетсовпетро”**

Свойства	№ 4	№ 3	№ 2
Плотность 20 °С, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	0.8519	0.8678	0.879
Температура конденсации нефти, $T_{\text{конд}}$ , °С	35.5	34.5	38.5
Вязкость кинематическая $\nu$ , мм <sup>2</sup> /с:			
при 50 °С	12.83	14.67	27.57
при 70 °С	6.60	7.66	16.62
Содержание парафина, $P$ , %	26.00	21.2	28.3
Температура плавления парафина, °С	58.7	58.9	60.5
Содержание асфальтены+смолы, %	7.21	9.06	14.04
Содержание серы, %	0.039—0.084	0.1	0.1
Молекулярная масса, а.е.м.	257.7—295.7	285.9	362.1

По результатам определения углеводородного (УВ) состава нефти образца № 4 методом  $D_{2892}/D_{5236}$  [5] в ней содержится (мас.%): *n*-парафинов 42.66, *изо*-парафинов 33.43, нафтенов 20.44, ароматики 3.46 %, причем парафины представлены в основном легкими молекулами в узком диапазоне чисел углеродных атомов  $C_4$ – $C_8$ , циклопарафины — в диапазоне чисел  $C_5$ – $C_7$  и бензола  $C_6$ .

Для решения поставленной задачи использован разработанный нами по ТУ 25-4823764.0031-90 и изготовленный в конструкторском бюро резонансных комплексов портативный переносной, с питанием от аккумулятора релаксометр ПМР-NP1 [6].

Критерий, по которому оценивается амплитуда сигнала ЯМР на фоне шумов приемника, для портативного релаксометра ПМР составляет  $K = \nu_0^2 D^3 = 2700$ — $4150$  МГц<sup>2</sup> · см<sup>3</sup>, где  $\nu$  — резонансная частота,  $D$  — диаметр датчика (высота катушки датчика равна диаметру). Оценка по критерию  $K$  следует из отношения сигнал/шум ( $S/N$ ) в приемном тракте [7]:

$$S/N = 4\pi s n \omega_0 M_0 Q \eta \cdot 10^{-2} / 1.2 \cdot 10^{-6} (Z_0 \Delta \nu F)^{1/2},$$

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

При оценке амплитуды сигнала по критерию  $K$  релаксометр близок к зарубежному аналогу — ЯМР-релаксометру Minispec Pc120 (Bruker, Германия). Минимальный интервал между импульсами  $\tau = 100$  мкс, максимальное количество импульсов  $N = 10000$ , число накоплений до  $n = 100$ . Задание параметров импульсных последовательностей осуществляется через клавиатуру ноутбука и высвечивается на мониторе. Время измерения в среднем  $\leq 2$  мин. По показателю чувствительности  $K = v_0^2 D^2 = 2285 \text{ МГц}^2 \cdot \text{см}^3$  релаксометр ПМР-NP1 близок к зарубежному аналогу Minispec Pc120.

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 ПМРР зависимости огибающей амплитуд  $A_e$  спин-эха, как правило, многоэкспоненциальные:

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

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

где  $A_0$  — суммарная амплитуда сигнала;  $P_{1i}$  и  $P_{2i}$  — относительное число протонов с разной степенью молекулярной подвижности;  $T_{1i}, T_{2i}$  — времена 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 (1) с использованием последовательности  $90^\circ\text{-}\tau\text{-}90^\circ\text{-}\tau_0\text{-}180^\circ$  Хана, где  $\tau = 30\text{—}70$  мс,  $\tau_0 = 300$  мкс;  $T_{2i}$  — многоимпульсной последовательности  $90^\circ\text{-}\tau_1\text{-}180^\circ\text{-}2\tau_1\text{-}180^\circ\text{-}2\tau_1\text{-}180^\circ \dots$  Карра—Парселла—Мейбум—Гилла [3], где  $\tau_1 = 300\text{—}500$  мкс, устраняющей 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  $\pm 3\text{—}4\%$ , амплитудных  $\pm 2\%$  и могут быть снижены в  $n^{1/2}$  раз путем  $n$  накоплений амплитуд сигналов спин-эха ПМР.

Определение ПМР-параметров осуществлялось построением огибающей в полулогарифмическом масштабе от времени и графоаналитическим разделением полиэкспоненциальной огибающей на три компоненты [7]. После логарифмирования амплитуд спин-эха через точки, соответствующие большим временам и описываемые линейной зависимостью, проводится прямая, в полулогарифмическом масштабе описываемая уравнением  $\ln(A_i/A_0) = -t/T_{2i} + \ln A_i$ . Последовательным вычитанием из экспериментальных точек данной и последующих прямых, соответствующих компонентам, 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-эха уменьшается в  $e$  раз. Огибающие разлагаются на три компоненты  $i = A, B, C$  при различии времен релаксации в 4—10 раз.

**Результаты и их обсуждение.** Исследования нефтей “Вьетсовпетро” стандартными методами. Зависимость вязкостей  $v_{50}$  и  $v_{70}$  от содержания парафина для всего массива нефтей имеет большой разброс значений (коэффициент корреляции  $R^2 < 0.2$ ) и сложный характер. Зависимости вязкости  $v_{50}$  и  $v_{70}$  от содержания асфальтенов представлены на рис. 1.

Зависимости кинематических вязкостей  $\nu$  ( $\text{мм}^2/\text{с}$ ) нефтей № 4, 3 и 2 при  $50$  и  $70^\circ \text{C}$  от концентрации асфальтенов и смол описываются с коэффициентами корреляции  $R^2 = 0.98$  и среднеквадратической ошибкой  $S = 0.5$ :

$$v_{50} = 5.41 \exp(0.115 C_{\text{Асф}} C_{\text{См}}) \text{ при } 50^\circ \text{C}, \quad (3)$$

$$v_{70} = 2.31 \exp(0.1394 C_{\text{Асф}} C_{\text{См}}) \text{ при } 70^\circ \text{C}, \quad (4)$$

в то время как вязкости  $v_{50}$  ( $\text{мм}^2/\text{с}$ ) для всего массива нефтей “Вьетсовпетро” описываются с коэффициентом корреляции  $R^2 = 0.549$  и  $S = 3.3$ :

$$v_{50} = 4.5 \exp(0.047 C_{\text{Асф}} C_{\text{См}}). \quad (5)$$

Из рис. 1 и уравнений (3)—(5) видно, что  $v_{50}$  и  $v_{70}$  экспоненциально пропорциональны концентрации асфальтенов и смол.

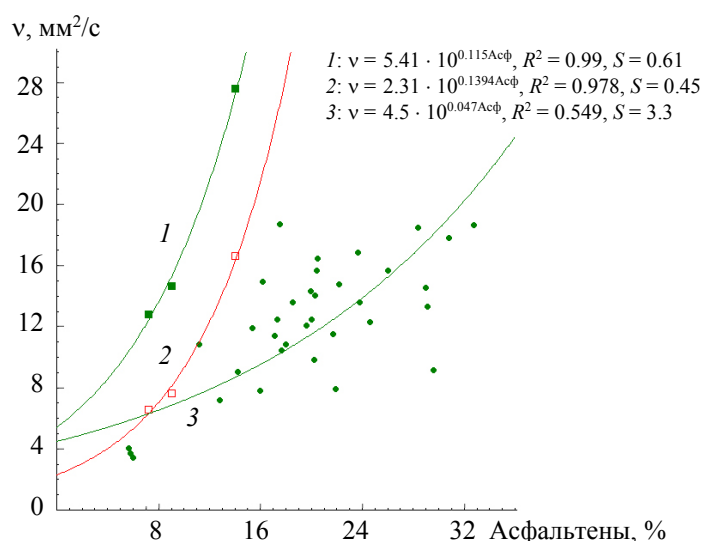


Рис. 1. Зависимости кинематических вязкостей нефтей № 4, 3 и 2 (Vach Но) при 50 (1) и 70 °С (2) от концентрации асфальтенов на фоне вязкостей нефтей “Вьетсовпетро” при 50 °С (3)

*Исследования нефтей “Вьетсовпетро” методами ПМРР.* Полученные данные требуют дальнейших исследований, в том числе квантово-механическим методом ПМРР. Возможно, на изменение физико-химических свойств влияет температура. Как отмечено в [9], по исследованиям *n*-парафинов в [10] с точностью  $\pm 2\%$  при температуре 295 °С впервые получена корреляция между вязкостью, временами спин-решеточной релаксации  $T_1$  и температурой  $T$ , впоследствии принятая как “стандарт парафиновой линии” (standard alkali-line), т. е.  $\eta T_{1,2}/T$  — корреляция для *n*-алканов:

$$T_1 = (2.712/\eta)(T/298) = (2.712/\nu\rho)(T/298). \quad (6)$$

Уравнение (6) следует из зависимости скоростей  $R_{1,2} = (T_{1,2})^{-1}$  протонной релаксации [11] от среднего молекулярного диаметра  $a_0$ , среднего межпротонного расстояния  $r_{ij}$ , времен корреляции вращательного и трансляционного движений  $\tau_R$  и  $\tau_D$  ( $\tau_D = a_0/12D$ ), коэффициента самодиффузии  $D$ :

$$R_{1,2} = (T_{1,2})^{-1} = 3\gamma^4 h^2 \tau_R / 8\pi^2 \sum r_{ij}^6 + \pi\gamma^4 h^2 N_I \tau_D (1 + 2a_0/5D\tau_D) / 4a_0^3, \quad (7)$$

где  $\gamma/2\pi = 4256$  рад/с · Гс — гиромангнитное отношение;  $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Дж/с — постоянная Планка;  $N_I = 6.75 \cdot 10^{28}$  м<sup>-3</sup> — число спинов. Вследствие аррениусова характера зависимости времен корреляции  $\tau_R$  и  $\tau_D$  от температуры  $T$ :

$$\tau_c = \tau_0 \exp(E_A/k_B T), \quad (8)$$

где  $E_A$  — средняя энергия активации молекулярного движения;  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $\tau_0 = 1/\nu_0$  — предэкспоненциальный множитель,  $\nu_0 = \tau_0^{-1}$  соответствует вибрационной частоте колебаний атомов между скачками.

В высокотемпературном приближении  $2\pi\nu\tau_R \ll 1$  можно учитывать только  $R_{2i} = (T_{2i})^{-1}$  от внутримолекулярного движения цепей и диполь-дипольного взаимодействия молекулярных ассоциатов. Тогда при  $\eta = \nu\rho = B T \exp(E_A/RT)$ , где  $B$  — постоянная, подстановкой (8) в (7) получим:

$$\eta T_{1,2}/T = \nu\rho T_{1,2}/T = \text{const}/\sum r_{ij}^{-6}, \quad (9)$$

т. е. постоянство  $r_{ij}$  должно приводить к постоянству  $\eta T_2/T = \text{const}$ , что подтверждается для УВ и легких нефтей [10]. Однако при переходе к тяжелым асфальтовыми и парафинистым нефтям равенство (9) не выполняется и наблюдаются зависимости скоростей релаксации  $R_{1,2} = (T_{1,2})^{-1}$  от  $10^3/T$  с увеличивающейся крутизной при понижении температуры [12], что свидетельствует об изменениях энергий активации  $E_{Ai}$  молекулярного движения.

Нефтяная промышленность нуждается в  $\eta T_{1,2}/T$ -корреляциях в расширенном диапазоне физико-химических свойств для тяжелых асфальтовых 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 асфальтенов.

**Т а б л и ц а 2. Технические характеристики ПМР NP2 в сравнении с лабораторными аналогами**

Технический параметр	ПМР NP-2 (КБРК, Казань)	ЯМР 08/РС (КБРК, Казань)	Minispec Pc 120 (Bruker, Германия)	UNIX ST 500 (UNIX Instr.)
Относительная ошибка измерений времен релаксации/амплитуд спин-эха, %	3/2	4/2	3	3
Критерий $K = v_0^2 V$ , МГц <sup>2</sup> ·см <sup>3</sup>	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, В	12, ≈220	≈220	≈220	≈220
Потребляемая мощность, Вт	15	60	300	40
Габариты, см:				
электронного блока	4×25×30	32×20×39	106×54×43	45×25×45
магнита	20×15×10	20×15×10	106×54×43	15×17×15
Масса, кг	<18	20	80	17

В [13] по анализу 66 образцов установлена корреляция для нефти в виде

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

модифицированная в [14] включением температуры  $T$  (К):

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

В [15] отмечено влияние на указанную корреляцию растворенного в нефти воздуха и введена степень 0.9 не только при  $\eta$ , но и при  $T/298$ . В [16] определена корреляция для дегазированных живых нефтей:

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

По результатам [17] корреляции  $T_{1A}$  и  $T_{2A}$  от  $T$  и  $\eta = \nu\rho$  для разных диапазонов вязкостей ( $\eta = 0.7$ —6 и 6—60 мПа·с) описываются уравнениями:

$$T_{1A} = (1.07/\rho^{0.3}\nu^{0.3})(T/298) \text{ для } \eta = 0.7\text{—}6.0 \text{ мПа}\cdot\text{с}, \quad (10)$$

$$T_{1A} = (2.78/\rho^{0.85}\nu^{0.85})(T/298) \text{ для } \eta = 6\text{—}60 \text{ мПа}\cdot\text{с}, \quad (11)$$

$$T_{2A} = (0.68/\rho^{0.4}\nu^{0.4})(T/298) \text{ для } \eta = 0.7\text{—}6.0 \text{ сПа}, \quad (12)$$

$$T_{2A} = (1.12/\rho^{0.8}\nu^{0.8})(T/298) \text{ для } \eta = 6\text{—}60 \text{ сПа}. \quad (13)$$

Преобразуя (11) и (13) для высоких вязкостей, получаем зависимости  $\eta(R_{1,2A})$  (рис. 2) или с учетом  $\nu = \eta/\rho$  с  $R^2 = 0.99$ ,  $S = 2$  имеем простые уравнения для  $\nu(R_{1,2A})$ :

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

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

На рис. 2 представлены зависимости концентраций асфальтенов от времен  $T_{2A}$  для нефтей Вах Но, а также для нефтей Поволжья и Западной Сибири, которые с коэффициентами корреляции  $R^2 = 0.956$  и  $S = 0.7$  описываются уравнениями:

$$C_{\text{Асф}} = 3.48\ln(T_{1A}) + 24, \quad (14)$$

$$C_{\text{Асф}} = 2.2\ln(T_{2A}) + 14.3, \quad (15)$$

$$C_{\text{Асф}} + C_{\text{См}} = 16.6\ln(T_{2A}) + 111. \quad (16)$$

Уравнения (14), (15) справедливы для отечественных нефтей Поволжья и Сибири, (16) — для нефтей Вах Но. С применением разработанной портативной автономной аппаратуры уравнение (16) может быть использовано в качестве экспресс-метода определения вязкости и асфальтенов в нефти в процессе ее добычи и транспортировки на месторождениях “Вьетсовпетро”.

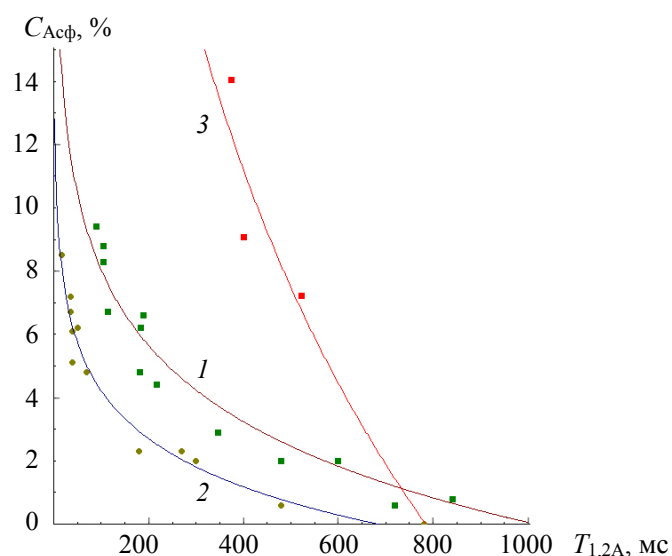


Рис. 2. Зависимости концентраций асфальтенов от измеренных времен  $T_{1,2A}$  для нефтей Поволжья и Западной Сибири (1 и 2) и Вах Но (3)

**Заключение.** Методами протонной магнитной резонансной релаксометрии исследованы образцы № 4 и 2 MSP-10 месторождения Вах Но, существенно отличающиеся от отечественных нефтей вязкостью, плотностью, концентрациями парафинов и асфальтенов. Установлено, что на вязкость влияет концентрация асфальтенов в нефти. Корреляции для нефтей не могут быть интерпретированы по “стандарту парафиновой линии”, сделано уточнение термина “стандарт” для вязких нефтей. Получены корреляции между вязкостью и концентрацией асфальтенов от скоростей и времен ПМР-релаксации отдельно для нефтей Вах Но и отечественных нефтей.

- [1] ГОСТ 8.615-2005 “Государственная система обеспечения единства измерений. Общие метрологические требования”
- [2] S. L. Scott. The American Oil & Gas Reporter (2001) 68—73
- [3] Р. С. Кашаев. Аппаратура и методики ЯМР-анализа нефтяных дисперсных систем. Lambert Academic Publ. (LAP), Saarbrücken (2012)
- [4] Е. Ю. Горюнов, М. Х. Нгуен. Нефть Газ, 4, № 64 (2018) 18
- [5] Quang Ngai. Crude Oil Assays Report 02/2016. Вах Но Crude Oil. Viet Nam National Oil and Gas Group “Binh Son Refining & Petrochemical Co., Ltd” (2016)
- [6] З. Ш. Идиятуллин, Р. С. Кашаев, А. Н. Темников. Портативный релаксометр ЯМР G01N24/08, патент РФ № 67719 (2007)
- [7] В. И. Чижик. Ядерная магнитная релаксация, Санкт-Петербург, СПбГУ (2004)
- [8] Р. С. Кашаев, З. Ш. Идиятуллин, А. Н. Темников. Устройство тестирования образца в датчике магнитного резонанса, патент РФ № 2319138 (2008)
- [9] I. Shikhof, C. H. Arns. Appl. Magn. Res., 47 (2016) 1391; doi:10.1007/s00723-016-0830-4
- [10] Р. С. Кашаев, Б. Ле, М. З. Зинятов. Докл. АН СССР, 157, № 6 (1964) 1438
- [11] А. А. Вашман, И. С. Пронин. Ядерная магнитная релаксация и ее применение в химической физике, Наука, Москва (1979)
- [12] Р. С. Кашаев. Научные основы структурно-динамического анализа НДС методом ЯМР, автореф. дис. ... д-ра тех. наук, Москва, ИГИ РАН (2001)
- [13] C. Morris, R. Freedman, C. Straley, M. Johnson, H. Vinegar, P. Tutunjian. SPWLA 35-th Ann. Logging Symp., 1 (1994) 1—24
- [14] H. Vinegar. SPWLA 36-th Ann. Logging Symp., 1 (1995) 1—24
- [15] Q. Zhang, S.-W. Lo, C. C. Huang, G. J. Hirasaki, R. Kabayashi, W. V. House. SPWLA 39-th Ann. Logging Symp., 1 (1998) 1—14
- [16] S.-W. Lo. Dissertation, Rice University (2002)
- [17] R. S. Kashaev. Appl. Magnet. Resonance, 49 (2018) 309; <https://doi.org/10.1007/s00723-018-0977-2>