

- при угле наклона скважины менее  $10^\circ$  расчет угла разворота прибора производить по алгоритмам, не использующим вертикальную составляющую;
- перед ГРП проводить фоновый замер.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Козяр Н. В. Оценка упругих параметров пород и направления развития трещины ГРП по материалам акустического каротажа: Доклад на научно-производственной конференции “Вопросы проектирования и предварительного рассмотрения документации на разработку месторождений нефти и газа в Западной Сибири и пути их решения”. 2009.
2. Tang X. M., Cheng A. Quantitative Borehole Acoustic Methods // Seismic Exploration. 2004. Vol. 24.

УДК 550.832.582:681.2.088

*E. M. Митюшин, Р. Т. Хаматдинов, В. К. Громцев, С. С. Сошин*

## СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ СИЛЬНОГО ПОЛЯ ЯДЕРНО-МАГНИТНОГО КАРОТАЖА В ООО “НЕФТЕГАЗГЕОФИЗИКА”

Рассмотрены вопросы применения российских приборов ядерно-магнитного каротажа искусственного поля. Описана методика метрологической аттестации соответствующей аппаратуры в ООО “Нефтегазгеофизика”.

*Ключевые слова: магнитное поле, ядерно-магнитный томографический каротаж, спиновое эхо, аппаратура, метрология, методика.*

2 февраля 2001 г. в Оренбургской области было проведено первое исследование скважины отечественным прибором ядерно-магнитного томографического каротажа (ЯМТК) [3, 7, 10]. На тот момент на российском рынке геофизических услуг для проведения ядерно-магнитного каротажа (ЯМК) в сильном магнитном поле использовались только два типа приборов: MRIL фирмы “Халлибартон” и CMR фирмы “Шлюмберже”. Несколько позже на российский рынок вышла фирма “Бейкер-Хьюз” с прибором MREX.

В основе технологии ЯМТК лежит защищенный патентом Российской Федерации [5] способ регистрации ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) в скважине, позволивший существенно поднять качество измерений. Кроме РФ, аналогичная аппаратура запатентована в ряде зарубежных государств (США, Норвегия, Великобритания, Канада, Мексика, Германия).

Технология ЯМТК предназначена для центрированных приборов, и область ее применения ограничена скважинами диаметром до  $\approx 300$  мм. Для скважин большего диаметра в ООО “Нефтегазгеофизика” разработана технология прижимных приборов ядерно-магнитного каротажа (ЯМТК-П), в которых зондовая установка имеет несимметричную конфигурацию магнитных полей, что позволяет ограничить область исследования относительно узким сектором. Способ формирования зоны исследования и соответствующее устройство защищены российским патентом [6]. Прижимной прибор проходит в настоящее время опытную эксплуатацию.

Номенклатура приборов ЯМК, разработанных в ООО “Нефтегазгеофизика”, и их основные характеристики представлены в таблице.

Исследования скважинными приборами ЯМТК и ЯМТК-П в России выполнены в осадочном чехле и фундаменте Русской платформы, Тимано-Печорской и Западно-Сибирской плит. В пределах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции исследованы продуктивные комплексы карбона, девона, а также архея. В Тимано-Печорской НГП исследованы продуктивные отложения пермского возраста. В основной нефтегазоносной провинции России – Западно-Сибирской – выполнены исследования в разрезах верхнего (сеноман) и нижнего (неоком) мела, юры и палеозоя. Исследованные ЯМК разрезы включали осадочные, магматические и метаморфические породы. Продуктивные комплексы были в основном представлены терригенными (кварцевые и арковые песчаники) и карбонатными породами. Глубины интервалов исследования скважин находились в диапазоне 500–4500 м, максимальная температура составляла 128 °С, давление – 60 МПа, угол наклона скважин – до 40°.

ООО “Нефтегазгеофизика” из года в год наращивает как объемы сервисных работ по ЯМК, так и производство соответствующих приборов. На диаграмме (рис. 1) показаны объемы сервисных работ ООО “Нефтегазгеофизика”, выполненные за последние 10 лет.

Таблица

Характеристики приборов ЯМК, разработанных в ООО "Нефтегазгеофизика"

Наименование прибора	ЯМТК-145	ЯМТК-145-Т	ЯМТК-120	ЯМТК-120-Т	ЯМТК-П	ЯМТК-А	ЯМР-релаксометр
1	2	3	4	5	6	7	8
Тип прибора	Серийный центрируемый	Серийный центрируемый	Серийный центрируемый	Серийный центрируемый	Опытный прижимной	Опытный автономный	Опытный
Макс. температура, °C	120	150	120	150	120	100	—
Макс. давление, МПа	80	110	80	110	80	80	—
Макс. диаметр, мм: без отклонителей с отклонителями	145 165	152 170	120 134	120 134	120 —	120 134	—
Длина прибора, м	7,2	10,8	7,2	10,0	7,2	11,0	—
Масса прибора в собранном виде, кг	258	420	226	350	220	425	10
Время непрерывной работы (при макс. температуре), ч	10	10	10	10	10	48 (деж. режим) 4 (режим изм.)	—
Постоянное магнитное поле, Гс	164	164	141	141	164	141	280
Радиочастотное поле, Гс	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	2,5
Частота, кГц	≈700	≈700	≈600	≈600	≈700	≈600	≈1200

## Окончание таблицы

	1	2	3	4	5	6	7	8
Градиент в зоне исследо- вания, Гс/см	20	20	20	20	20	20	20	0,4, 10, 20
Минимальное время раз- движки, $T_E$ , мс	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,3
Число сигналов эха	До 1000	До 1000	До 1000	До 8000				
Скорость каротажа, м/ч	100	100	100	100	100	100	100	—
Диапазон измерения амп- литуды сигнала, %	0–100	0–100	0–100	0–100	0–100	0–100	0–100	0–100
Погрешность измерения пористости (3 накопле- ния), %	1	1	1	1	4 (6 накоп- лений)	1	1	0,1 (10 на- коплений)
Диапазон измерения вре- мени поперечной релак- ции, $T_2$ , мс	1–3000	1–3000	1–3000	1–3000	1–3000	1–3000	1–3000	0,3–3000
Вертикальное разреше- ние, мм	620	620	620	620	620	620	620	Керн ( $\emptyset =$ 30 мм, $h =$ 35 мм)
Диаметр зоны исследова- ния, мм	340	340	280	280	Глубин- ность 50 мм	280	280	—
Толщина зоны исследова- ния, мм	0,5–1	0,5–1	0,5–1	0,5–1	0,5–1	0,5–1	0,5–1	—
Сопротивление бурового раствора, Ом·м	> 0,04	> 0,04	> 0,04	> 0,04	> 0,02	> 0,07	> 0,07	—

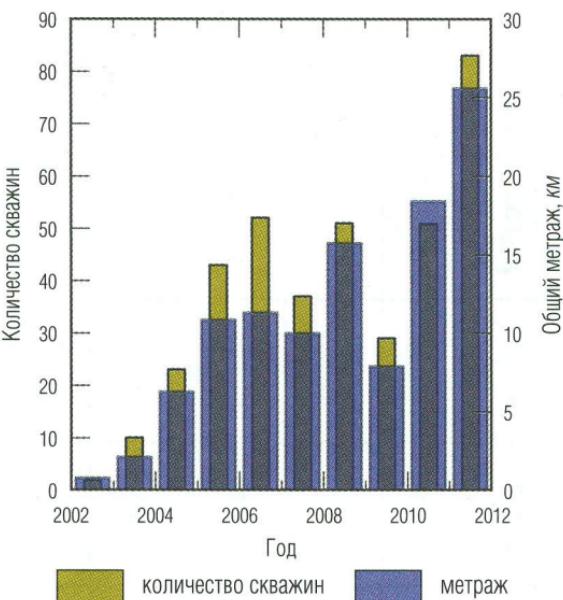


Рис. 1. Диаграмма развития сервисных работ (методом ЯМК) ООО “Нефтегазгеофизика” по годам

Положительная динамика развития ядерно-магнитного каротажа по российской технологии ЯМТК обусловлена следующими причинами:

- 1) соответствие основных характеристик прибора требованиям к ЯМК в сильном поле, что обеспечивает решение геологических задач как по определению фильтрационно-емкостных характеристик (ФЕС) геологического разреза, так и по определению насыщенности пластов;
- 2) представление материалов заказчику в привычном для него виде, то есть в форме заключения по разрезу, с полными данными по пластам;
- 3) консультации с заказчиком по неясным вопросам интерпретации;
- 4) полная открытость элементов технологии на всех ее этапах.

Результаты применения ЯМК в сильном поле подтверждены как многочисленными зарубежными публикациями на основе тысяч скважин, так и опытом работ, выполненных в ООО “Нефтегазгеофизика” (более 350 скважин в различных геологических условиях России). Успешно решаются задачи по определению насыщенности породы

различными видами углеводородов. Ограничения ЯМК, связанные с наличием в пластах газа или тяжелых нефтей (битума), достаточно надежно устраняются в комплексе с другими видами ГИС (ЭК, РК) [10].

Результаты ЯМК рекомендованы к использованию “Методическими рекомендациями по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом”, согласованными с ГКЗ МПР России.

В целом можно сказать, что метод ЯМК подтвердил свою эффективность в геофизических исследованиях, и вопрос о его полезности в настоящее время уже не стоит. Однако существует проблема обеспечения единства измерений с обязательной метрологической аттестацией аппаратуры ЯМК, подготовленной к производственному применению. Один из способов аттестации рассмотрен в настоящей работе.

Процесс измерения в приборах серии ЯМТК включает в себя намагничивание статическим магнитным полем ядер водорода в исследуемой породе, их импульсное возбуждение и прием сигналов спинового эха в промежутках между импульсами. Возбуждение и прием осуществляются по методу Карра–Парселла–Мейбума–Гилла (КПМГ) [11], который ориентирован на измерение времени поперечной (или спин-спиновой) релаксации  $T_2$ . Выходным сигналом приборов является последовательность зарегистрированных сигналов эха (релаксационная кривая). Период следования возбуждающих импульсов (далее раздвижка) обычно обозначается как  $T_E$ , а интервал между соседними последовательностями КПМГ как  $T_W$ . Для повышения информативности регистрируемых данных в аппаратуре ЯМТК используется несколько режимов работы, которые отличаются значениями  $T_E$  и  $T_W$ .

Сигнал, регистрируемый в методе КПМГ, может быть разложен на совокупность отдельных экспоненциальных релаксаций [4, 12], распределение амплитуд которых по временам их релаксаций отражает распределение пор по размерам. Это позволяет перейти от сигнала ЯМР к распределению пор по размерам, а затем к оценке ФЕС исследуемой породы и решению поставленных геофизических задач. Следовательно, прибор, подготовленный к производственному применению, должен корректно регистрировать релаксационные кривые во всем диапазоне времен  $T_2$ , характерных для горных пород. Обычно для метрологической оценки такой характеристики аппаратуры предлагается использовать ряд жидкостей с различными

временами релаксации  $T_2$  [1]. Однако этот метод представляется нам неудовлетворительным по следующим причинам:

- 1) отсутствуют метрологические средства, определяющие истинное значение  $T_2$  для жидкости, использованной в эталонной среде;
- 2) отсутствует методика создания растворов с заведомо определенным значением  $T_2$ .

Кроме того, применение специальных жидкостей не отвечает на вопрос, насколько правильно измеряется релаксационная кривая с позиций соблюдения всех требований метода КПМГ.

В ООО “Нефтегазгеофизика” используется метод поверки  $T_2$  в одной емкости с одной жидкостью (водой). При этом в качестве варьируемого параметра используется не истинное значение  $T_2$  жидкости, а наблюдаемое, которое определяется параметрами последовательности КПМГ, градиентом статического магнитного поля прибора и диффузией молекул жидкости. Прибор ЯМТК в зоне исследования имеет градиент магнитного поля порядка 20 Гс/см. Молекулы воды, диффундируя, переходят из области с одним значением поля в область с другим значением. При этом происходит расфазировка сигнала ядерной индукции, что вызывает его дополнительное затухание, которое выражается в уменьшении регистрируемого  $T_2$ .

В общем виде затухание сигнала ЯМР в воде определяется тремя процессами релаксации [8]: объемной (характеризуется временем  $T_{bulk}$ ), поверхностной ( $T_S$ ) и диффузионной ( $T_D$ ). Если измерения проводятся в большом объеме, например в баке, то поверхностной релаксацией можно пренебречь, тогда для наблюдаемого времени  $T_2$  можно записать:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{bulk}} + \frac{1}{T_D}, \quad (1)$$

причем

$$T_D = \frac{12}{D(\gamma G T_E)^2}, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент самодиффузии воды,  $\gamma$  – гиромагнитное отношение ядер водорода (эти параметры определяют свойства воды);  $G$  – градиент магнитного поля в зоне исследования;  $T_E$  – интервал времени между радиоимпульсами (эти параметры определяют свойства прибора). При фиксированных значениях  $G$  и  $T_E$  вода, в

первом приближении, характеризуется одним временем поперечной релаксации  $T_2$ , поэтому сигнал ЯМР, вызванный релаксацией воды в большом объеме, будет иметь следующий вид:

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{t}{T_2}}, \quad (3)$$

где  $t$  – время;  $A_0$  – амплитуда сигнала в момент времени  $t = 0$ .  $A_0$  пропорциональна общей пористости исследуемой среды.

Используя только одну емкость с водой, соотношения (1) и (3) позволяют имитировать релаксационные кривые в широком диапазоне изменения  $T_2$ . Для этого необходимо провести измерения при различных значениях  $T_E$ . Так, в приборе ЯМТК (при градиенте в зоне исследования  $20 \text{ Гс/см}$ ) изменением  $T_E$  от  $0,8 \text{ мс}$  до  $8 \text{ мс}$  можно получить  $T_2$  в пределах от  $1,2 \text{ с}$  до  $20 \text{ мс}$ . Этот диапазон охватывает практически все значения  $T_2$ , характерные для различных значений эффективной пористости и пористости капиллярно-связанной воды в реальных породах. Отметим, что при всех метрологических испытаниях зондовая установка приборов должна помещаться в электромагнитный экран, обеспечивающий ослабление внешних помех не менее, чем на  $40 \text{ дБ}$ . Результаты измерений для различных  $T_E$  на одном из приборов ЯМТК представлены на рис. 2.

После регистрации полученные данные обрабатываются по следующему алгоритму:

1. Каждая релаксационная кривая методом наименьших квадратов аппроксимируется функцией вида

$$A_j(t) = A_{0j} e^{-\frac{t}{T_{2j}}}, \quad (4)$$

в которой индексом  $j$  обозначен номер соответствующей кривой. Таким образом определяются коэффициент  $A_{0j}$  и постоянная времени затухания  $T_{2j}$ .

2. Из исходных данных вычитаются аппроксимирующие функции и определяется среднее квадратичное отклонение (СКО) результатов измерений от значения аппроксимирующей функции ( $\text{СКО}_{approx}$ ).

Исходные данные считаются достоверными, если  $\text{СКО}_{approx}$  по всем измерениям не превосходят  $1\text{--}2\%$  от  $A_{0j}$ . Более высокие значения этой величины указывают на присутствие дополнительных помех промышленного происхождения. В этом случае в первую очередь

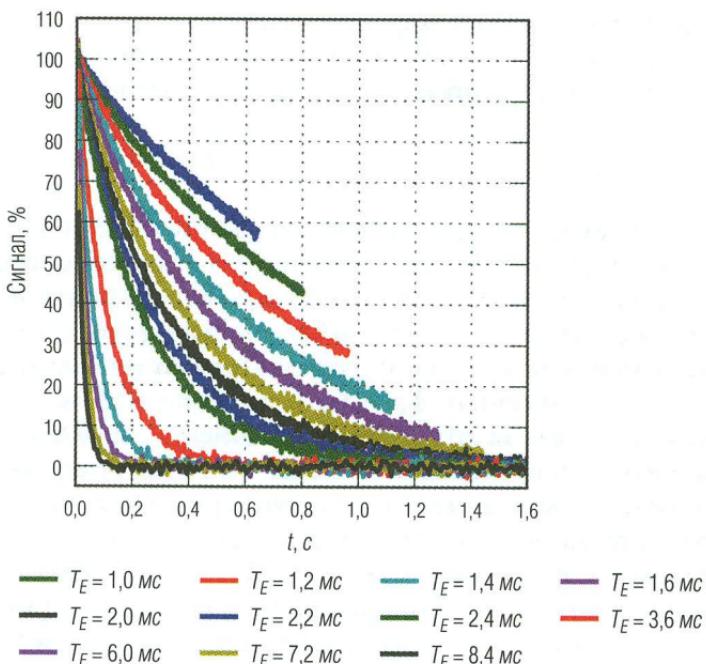


Рис. 2. Результаты измерений релаксационных кривых на приборе ЯМТК в баке с водой при значении градиента магнитного поля  $G = 20 \text{ Гс/см}$  и количестве импульсов в последовательности КПМГ  $N_E = 800$  при различных значениях  $T_E$

необходимо проверить все точки заземления экрана и прибора. Затем, если СКО  $\text{CKO}_{approx}$  не снижается, можно при проведении метрологических операций увеличить количество накоплений сигнала.

На основе полученных данных строится зависимость  $T_{2j}(T_{Ej})$  (рис. 3), которая аппроксимируется теоретической функцией вида:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{bulk}} + \frac{D(\gamma G)^2}{12} T_{Ej}^2. \quad (5)$$

Среднее квадратичное отклонение экспериментальных данных от (5) не должно превышать 1% от  $T_{2j}$ , в противном случае результаты считаются недостоверными.

Анализ экспериментальной зависимости, приведенной на рис. 3, позволяет оценить ряд следующих существенных характеристик исследуемой аппаратуры:

- 1) линейность характеристики говорит о том, что во всем диапазоне изменений  $T_E$  в последовательности КПМГ не изменяются параметры радиоимпульсов по частоте, фазе и амплитуде, то есть достаточно строго соблюдаются когерентность сигналов, что минимизирует аппаратурные систематические искажения релаксационной кривой и, кроме того, обеспечивает условия оптимального приема сигналов спинового эха;
- 2) значение зависимости (5) при  $T_E = 0$  определяет время объемной релаксации воды  $T_{bulk}$ , которое должно составлять не менее 2,3 с;
- 3) наклон зависимости (5) при известном коэффициенте самодиффузии  $D$  дает реальное значение градиента  $G$  статического магнитного поля прибора в зоне исследования.

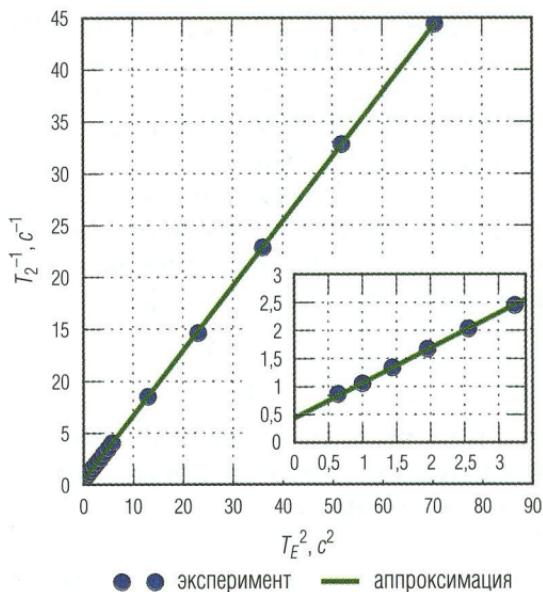


Рис. 3. Зависимость между  $T_2^{-1}$  и  $T_E^2$ . Точками обозначены данные, рассчитанные для экспериментальных кривых, приведенных на рис. 2. Сплошной линией показана аппроксимация этих данных функцией (5). На врезке в увеличенном виде приведен участок рисунка, соответствующий коротким  $T_E$ . Обозначения на врезке имеют тот же смысл, что и на основном графике. Результаты аппроксимации дают для градиента  $G$  магнитного поля в зоне исследования значение 20,8 Гс/см, для времени объемной релаксации воды  $T_{bulk}$  значение 2,36 с

Детальное рассмотрение экспериментальных зависимостей (рис. 3) позволяет выявить не только случайные, но и систематические погрешности, которые сопровождают процесс регистрации релаксационной кривой. В частности, к систематической погрешности приводит эффект “стимулированного” сигнала эха [9], проявляющийся в искажении начального участка релаксационной кривой. Для примера на рис. 4 приведены первые четыре точки кривой для  $T_E = 1 \text{ мс}$  из рис. 2. Видно, что первая точка лежит существенно ниже ожидаемого значения ( $\approx 100\%$ ), вторая оказывается завышенной, и только третья и четвертая точки дают результат, который в пределах погрешности измерений соответствует основному тренду. Теоретически этот эффект подробно рассмотрен в [9], где также рассчитаны поправочные коэффициенты. Однако наши исследования показали, что на практике коэффициенты, определяющие отклонение первых точек от экспоненциального тренда, зависят от ряда факторов, которые в своей совокупности являются трудноучитываемыми. К таким факторам относятся длительность и амплитуда возбуждающих импульсов, распределения радиочастотного и статического полей в зоне исследования, характеристики приемных контуров приборов.

Поэтому в аппаратуре ЯМТК для определения поправочных коэффициентов на первые точки используются экспериментальные данные. Коэффициенты определяются из формулы

$$k_i = \frac{A(iT_E)}{A_i}, \quad (6)$$

где  $k_i$  – поправочный коэффициент для  $i$ -й точки;  $A(iT_E)$  – значение релаксационной кривой в момент времени  $iT_E$ , определенное по формуле (4);  $A_i$  – экспериментальное значение  $i$ -й точки релаксационной кривой (рис. 4).

Практика показывает, что поправка на “стимулированное” эхо особенно важна при регистрации данных от флюидов с коротким временем релаксации (глины, капиллярно-связанная вода). В этом случае время поперечной релаксации  $T_2$  лежит в пределах от долей миллисекунды до нескольких десятков миллисекунд. В приборах ЯМТК для таких сред существует специальный режим (“канал глин”) с коротким промежутком ( $T_W$ ) между последовательностями.  $T_W$  этого режима составляет 20 мс, что обеспечивает регистрацию только коротких компонент релаксационной кривой. Очевидно, что

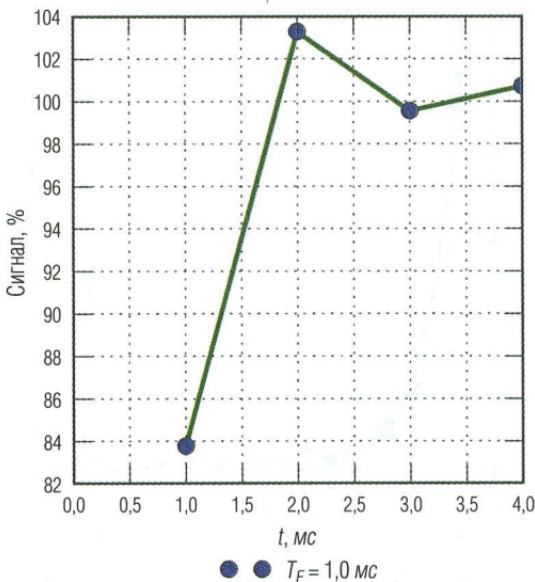


Рис. 4. Первые четыре точки релаксационной кривой при  $T_E = 1 \text{ мс}$

результаты регистрации по “каналу глин” и по основному режиму должны полностью совпадать при измерениях в однородном флюиде с коротким временем релаксации. На приборах серии ЯМТК такое исследование проводится в водном растворе, содержащем парамагнитные ионы  $Mn^{++}$ , который дает времена  $T_2$  порядка 1 мс. Результаты испытаний приведены на рис. 5, где одновременно показаны первые точки релаксационных кривых, снятых на разных раздвижках  $T_E$  в основном режиме измерений (на рисунке обозначены как RLX) и в режиме измерения глин (обозначены как RLC). Видно, что результаты всех измерений с хорошей точностью ложатся на одну экспоненциальную кривую, проведенную сплошной линией. Время  $T_2$  этой кривой равно 0,7 мс.

По результатам испытаний можно сделать вывод о том, что приборы серии ЯМТК охватывают весь диапазон времен релаксации, характерный для исследуемых горных пород. Предложенная методика аттестации позволяет удовлетворительно оценить работоспособность аппаратуры ЯМК. К достоинствам методики относятся небольшая трудоемкость проводимых операций, незначительные временные

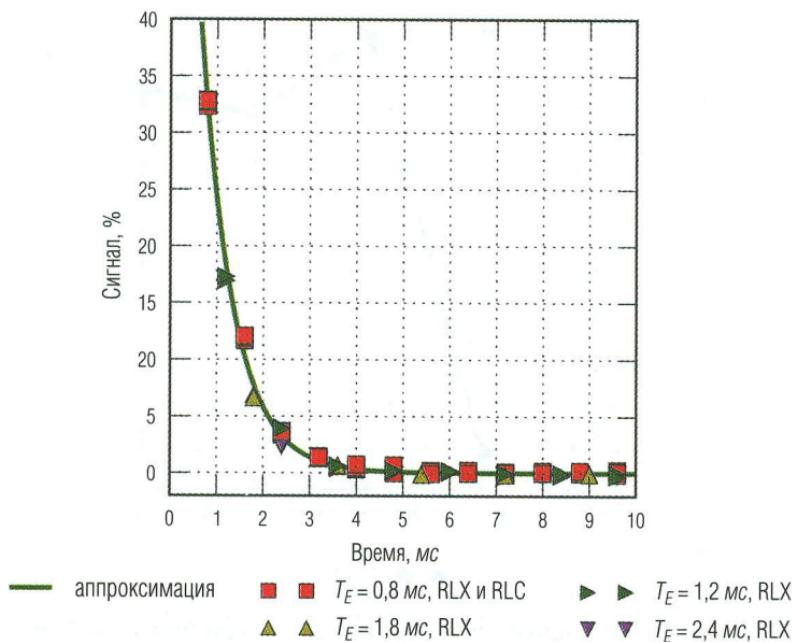


Рис. 5. Начальные участки релаксационных кривых, снятых на приборе ЯМТК. Кривые получены в режимах RLX ( $T_w = 10 \text{ с}$ ) и RLC ( $T_w = 20 \text{ мс}$ ). Режим RLC регистрировался только при  $T_E = 0,8 \text{ мс}$ . Данные сгруппированы по раздвижкам. Сплошной линией показано одноэкспоненциальное приближение с  $T_2 = 0,7 \text{ мс}$

затраты, простота автоматизации процедуры и широкий спектр тестируемых параметров. Однако очевидно, что описанные эксперименты не дают строгих метрологических оценок погрешностей аппаратуры, а скорее представляют собой операции по выявлению аппаратурных искажений измерительного процесса, которые в обязательном порядке должны обнаруживаться и устраняться в аппаратуре, подготовленной к производственной эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аксельрод С. М., Неретин В. Д. Ядерный магнитный резонанс в нефтегазовой геологии и геофизике. М.: Недра, 1990. С. 69.
2. 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.

3. 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. № 1. С. 43–50.
4. Мурцовкин В. А. Использование мультирешеточной капиллярной модели для расчета проницаемости по данным ядерного магнитного резонанса // Коллоидный Журнал. 2009. Т. 71. № 5. С. 685–692.
5. Пат. РФ № 2181901. Способ каротажа с использованием ядерно-магнитного резонанса и устройство для его осуществления / Митюшин Е. М., Барляев В. Ю., Хаматдинов Р. Т. 2002.
6. Пат. РФ № 2367982. Способ каротажа с использованием ядерно-магнитного резонанса и устройство для его осуществления / Митюшин Е. М., Сошин С. С., Хаматдинов Р. Т. 2009.
7. 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. 138–169.
8. Dunn K.-J., Bergman D. J., LaTorra G. A. Nuclear Magnetic Resonance. Petrophysical and Logging Applications. New York: Pergamon, 2002. P. 94.
9. Goelman G., Prammer M. G. The CPMG Pulse Sequence in Strong Magnetic Field Gradients with Applications to Oil-Well Logging // Journal of Magnetic Resonance, Series A. 1995. Vol. 113. № 1. P. 11–18.
10. Khamatdinov R., Mityushin E., Murtsovkin V., Tiller D., Jonkers J. Field Test of a New Nuclear Magnetic Resonance Tool // SPWLA 44 Annual Logging Symposium, 2003. Paper AAA.
11. Meiboom S., Gill D. Modified SpinEcho Method for Measuring Nuclear Relaxation Times // Rev. Sci. Instrum. 1958. № 29. c. 688.
12. Straleya C., Rossinia D., Vinegarb H., Tutunjianb P., Morriss C. Core Analysis by Low-Field NMR // The Log Analyst. 1997. Vol. 38. № 2. P. 84–94.