

Результаты исследований и работ ученых и конструкторов

УДК 550.832.582

*А. С. Зеленов, Ю. Л. Иванов
ООО "Нефтегазгеофизика"*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАДИЕНТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ ЯДЕРНО-МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Описан механизм влияния градиента магнитного поля на результаты измерений методом ядерно-магнитного резонанса (ЯМР). Приведен способ введения поправки в спектры времен поперечной релаксации на неоднородность магнитного поля (поправка на диффузию) при известном характере насыщения. Рассмотрены результаты применения предлагаемой поправки на модельных спектрах. Проведена оценка работоспособности методики на образцах керна с использованием данных, полученных на ЯМР-релаксометре Экспо-Керн.

Ключевые слова: петрофизика, каротаж, ядерный магнитный резонанс, диффузия, магнитное поле, моделирование, релаксометр.

В последнее время в практике геофизических исследований все большее распространение получают методы, основанные на использовании эффекта ядерного магнитного резонанса для получения информации о строении и характере насыщения горных пород. Эти методы действительно являются одними из наиболее информативных

в современном комплексе геофизических исследований и позволяют получить информацию о распределении пористости по размерам пор, что в свою очередь дает возможность оценить такие петрофизические характеристики, как пористость, проницаемость, параметр пористости и т. п. [1, 2]. С каждым годом появляется все большее количество ЯМР-аппаратуры с различными характеристиками. Для получения корректных и сравнимых между собой результатов необходимо правильно учитывать как условия, в которых проводились измерения, так и характеристики используемой при измерениях аппаратуры. В данной статье рассматривается влияние градиента магнитного поля на результаты измерений методом ядерного магнитного резонанса.

Метод ЯМР основан на наблюдении эффектов, вызванных взаимодействием ядер водорода друг с другом и с окружающими их частицами. Исследуемые объекты помещаются в достаточно сильное магнитное поле, на которое затем воздействуют радиоимпульсом высокой частоты, после чего регистрируют сигналы спин-эхо. При проведении как скважинных, так и лабораторных измерений в сильных магнитных полях используется импульсная последовательность Карра–Парселла–Мейбум–Гилла (КПМГ), состоящая из одного 90° импульса и следующих за ним 180° импульсов с интервалом TE . Результатом измерения является релаксационная кривая, которая затем преобразуется в спектр времен поперечной релаксации.

Преобразование релаксационной кривой в спектр, которое также часто называют инверсией, сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода:

$$\int_{T_{2\min}}^{T_{2\max}} B(T_2) \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} dT_2 = A(t), \quad (1)$$

то есть к нахождению распределения $B(T_2)$. Здесь $A(t)$ – сигнал ЯМР-релаксации; t – время; $T_{2\min}$ и $T_{2\max}$ – соответственно минимальное и максимальное время поперечной релаксации. Это уравнение относится к классу некорректно поставленных задач. Некорректно поставленные задачи – это задачи, решения которых неустойчивы к малым изменениям исходных данных. Они характеризуются тем, что сколь угодно малые изменения исходных данных могут приводить к произвольно большим изменениям решений. Для решения подобных уравнений используется метод регуляризации А. Н. Тихонова, специально раз-

работанный для данных задач [5]. Решением уравнения (1) является спектр времен релаксации $B(T_2)$, характеризующий сигнал $A(t)$.

При таком подходе полученный в результате инверсии спектр $B(T_2)$ является зависимым от градиента магнитного поля, параметров последовательности КПМГ и от других факторов. Это объясняется тем, что в релаксации флюидов, находящихся в поровом пространстве породы, участвуют три составляющие: объемная, поверхностная и диффузионная релаксации. Относительный вклад каждой из них зависит от типа флюида в порах (вода, нефть или газ), размера пор, величины релаксационной активности и типа смачиваемости поверхности породы. Все три процесса действуют одновременно, и соответствующие им времена релаксации соотносятся следующим образом:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2B}} + \frac{1}{T_{2S}} + \frac{1}{T_{2D}}, \quad (2)$$

где T_2 – измеренное с помощью последовательности КПМГ время поперечной релаксации; T_{2B} , T_{2S} , T_{2D} – время объемной, поверхностной и диффузионной релаксации соответственно. Рассмотрим их по порядку.

Объемная релаксация является характеристикой собственно порового флюида и зависит от его вязкости и химического состава. На нее также оказывает влияние температура. Объемная релаксация может быть измерена в однородном магнитном поле, если флюид помещен в достаточно большой резервуар.

Поверхностная релаксация происходит на границе раздела между жидкостью и твердым телом, то есть на поверхности зерен породы. Именно механизм поверхностной релаксации позволяет получать распределение пор по размерам по данным метода ЯМР.

Диффузионная релаксация. Если в постоянном магнитном поле присутствует достаточно большой градиент, диффузия молекул увеличивает скорость спада сигнала поперечной релаксации. Это объясняется тем, что в процессе измерения молекулы свободно перемещаются между областями, в которых сила магнитного поля, а следовательно, и скорость прецессии различны. Вследствие этого происходит дополнительный фазовый сдвиг, который не компенсируется фазирующими 180° импульсами, что и уменьшает регистрируемое время T_2 . Газы, легкие нефти, вода и некоторые нефти средней вязкости обладают различным временем диффузионной релаксации.

Для таких флюидов диффузионное время релаксации может служить важным механизмом их идентификации

Таким образом, если флюид находится в градиентном магнитном поле, а для измерения используется последовательность КПМГ, то зарегистрированное время релаксации будет меньше истинного (зарегистрированного в однородном магнитном поле) T_2 . Разница будет определяться величиной градиента магнитного поля, временем между 180° импульсами в последовательности, а также вязкостью самого флюида.

Необходимо отметить, что помимо градиента, используемого при измерении магнитного поля, существуют также и внутренние градиенты, возникающие в самой породе. Возникновение этих градиентов обусловлено наличием парамагнитных включений. Они могут достигать значительных величин и существенно затруднять регистрацию сигналов ЯМР. Влияние внутренних градиентов на результаты измерений в данной статье не рассматривается.

Как было отмечено выше, наличие диффузионной релаксации является важным механизмом для типизации флюидов. Однако при определении петрофизических характеристик с использованием распределения пор по временам релаксации, укороченного в результате влияния диффузионной релаксации, могут возникать значительные неточности. Релаксометры, применяемые для исследования керна в лабораторных условиях, как правило, работают в однородном магнитном поле. Соответственно и полученные при их использовании модели и зависимости для определения петрофизических величин с помощью метода ЯМР справедливы для исследований, проводимых в однородном магнитном поле. Большая же часть современной геофизической скважинной аппаратуры ЯМК [4], напротив, работает в градиентных магнитных полях. Это обусловлено как особенностями их конструкции, так и необходимостью характеризовать насыщенность поровых коллекторов. Поэтому важной задачей при обработке данных ядерно-магнитного каротажа в этом случае является приведение результатов измерения в соответствие с результатами, полученными в условиях лабораторий, то есть введение поправки на градиент магнитного поля (поправки на диффузию). Это позволяет применять к данным каротажа разработки и методики, отработанные в лабораторных условиях на образцах керна. В противном случае возникает необходимость разработки всего комплекса петрофизического обеспечения для каждой модификации аппаратуры.

В общем случае эту задачу можно решать двумя способами. Первый способ – введение поправки непосредственно в первичные данные, в данном случае в релаксационную кривую. Второй способ – введение поправки в результат обработки первичных данных – в спектр времен релаксации T_2 . Первый способ легко реализуем только в том случае, если релаксационная кривая является простой одноэкспоненциальной функцией, например для простых жидкостей. Поскольку в случае ЯМР-измерений в пористых средах релаксационная кривая представляет собой суперпозицию большого числа экспонент, необходимо вводить поправки в спектр распределения T_2 . При этом основную трудность представляет нелинейность зависимости зарегистрированного в градиентном поле времени релаксации от истинного времени релаксации T_2 (зарегистрированного в однородном поле), которую необходимо для этого использовать (рис. 1).

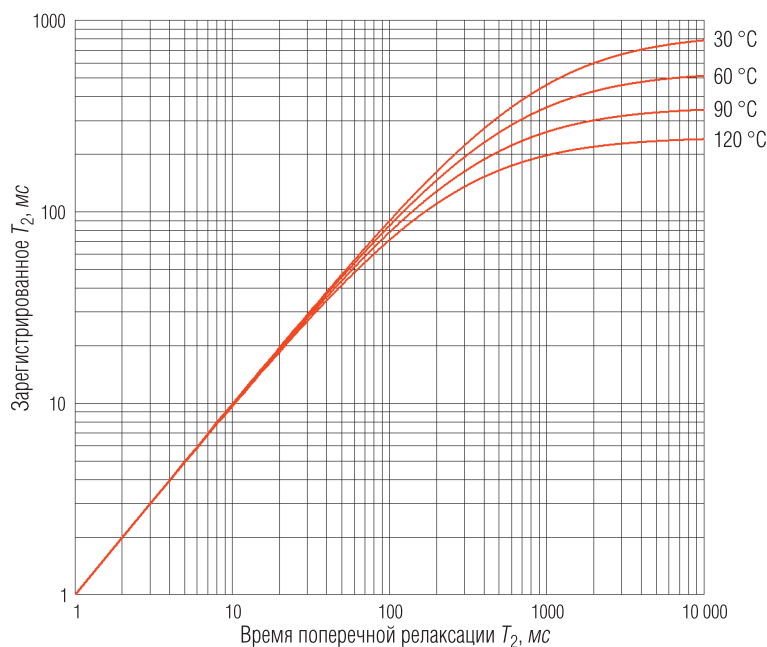


Рис. 1. Зависимость зарегистрированного времени T_2 от истинного при разных температурах для градиента магнитного поля 20 Гс/см и раздвижки $TE = 1,2$ мс

Как видно из рис. 1, при небольших значениях времен поперечной релаксации (до 10 мс) зависимость практически линейна. Затем при увеличении T_2 она приобретает сильную нелинейность, и при достаточно больших временах существенные изменения в истинном времени поперечной релаксации не соответствуют таковым в зарегистрированном T_2 . Это приводит к существенным сложностям при определении истинного T_2 по данным, полученным в градиентных полях, особенно при высоких температурах, когда сигнал еще и сильно зашумлен.

Для того чтобы учесть влияние диффузии и исключить его из полученного спектра на этапе инверсии, необходимо изменить решаемое интегральное уравнение следующим образом:

$$\int_{T_{2\min}}^{T_{2\max}} B(T_{2S}) \cdot e^{-\left(\frac{1}{T_{2S}} + \frac{1}{T_{2B}} + \frac{1}{T_{2D}}\right)t} dT_2 = A(t). \quad (3)$$

Чтобы найти решение, в данном случае необходимо определить время объемной релаксации T_{2B} и время диффузионной релаксации T_{2D} . Это возможно только в том случае, если известен характер насыщения. Полученное в результате распределение $B(T_{2S})$ характеризует неизмененное диффузией распределение пористости по временам релаксации.

Механизм введения поправок продемонстрирован на примере обработки модельных спектров горных пород. На рис. 2 приведен пример восстановления модельного спектра с характерными для песчаников максимальными временами релаксации 200–300 мс.

На рис. 2, а показано восстановление спектра без использования поправки, то есть решение уравнения (1). Восстановленный спектр (на рис. обозначен синим цветом) в этом случае несколько короче модельного оригинала (обозначен красным цветом). На рис. 2, б при восстановлении применен описанный алгоритм введения поправки – решение уравнения (3). Из графика видно, что полученный этим способом спектр лучше описывает модельный и соответствует ему по максимальным временам.

На рис. 3 приведен пример восстановления модельного спектра с более длинными временами релаксации – свыше 500 мс, характерными для карбонатных отложений.

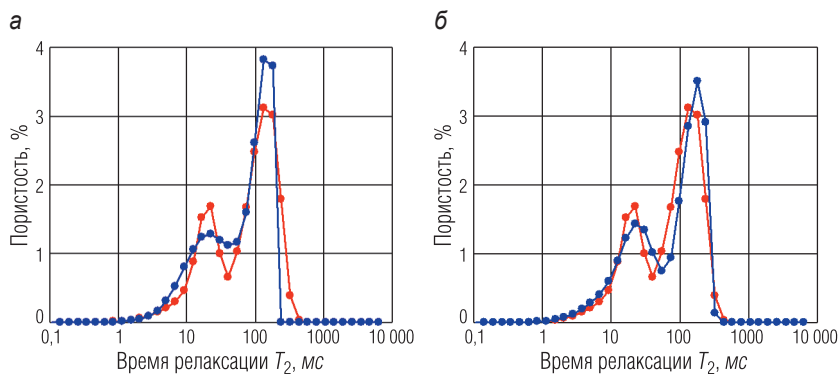


Рис. 2. Восстановление модельных спектров горных пород (модель, характеризующая песчаники): а – без использования поправки; б – при введении поправки

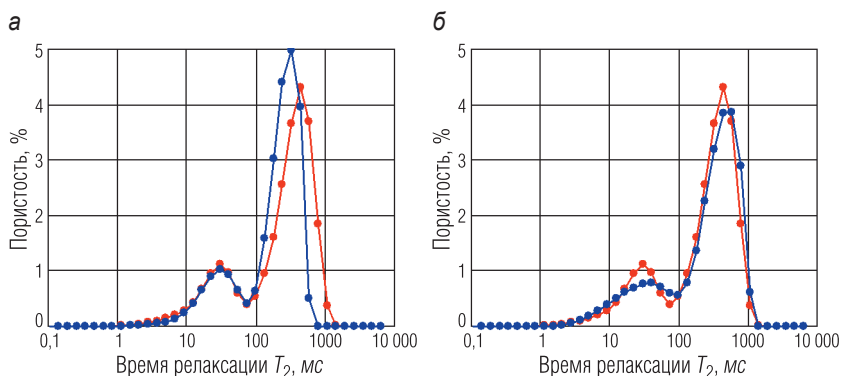


Рис. 3. Восстановление модельных спектров горных пород (модель, характеризующая карбонаты): а – без введения поправки; б – при введении поправки

В данном случае видно более значительное, чем в предыдущем случае, укорочение восстановленного без введения поправки спектра (рис. 3, а). Как и в предыдущем случае, при введении поправки на диффузию спектр был полностью восстановлен (рис. 3, б).

Проведенные на модельных системах исследования показали, что для приведенных параметров ошибка (в сторону уменьшения) при определении максимального времени T_2 спектра в среднем состав-

ляет около 50 мс для песчаников и около 300 мс для карбонатных пород. Это в свою очередь приводит к ошибкам при определении петрофизических параметров, полученных с использованием спектра времен релаксации. Так, например, для карбонатных моделей, при определении проницаемости с помощью модели среднего логарифмического T_2 , ее величина может быть занижена в два раза. При этом следует отметить, что во всех случаях значения общей и эффективной пористостей были хорошо восстановлены вне зависимости от примененных методик инверсии. Это объясняется тем, что общая пористость является интегральной характеристикой спектра, а значения отсечек, применяемых для разделения пористости на связанную и эффективную, находятся в короткой временной области и поэтому практически не подвержены влиянию диффузии.

Проверка достоверности полученных в работе результатов была проведена на образцах керна с различных месторождений. Исследования проводились с использованием ЯМР-релаксметра Экспо-Керн [3], разработанного в ООО «Нефтегазгеофизика» и дающего возможность проводить измерения как в однородном, так и в градиентном магнитном поле. При этом параметры градиентного поля в области измерения релаксметра близки к аналогичным в области исследования скважинной аппаратуры ЯМК. Градиент магнитного поля при проведении исследований составлял 20 Гс/см.

На рис. 4 приведены несколько примеров сравнительной обработки данных керна. Измерения проводились в однородном магнитном поле, а затем в градиентном. Данные, полученные в градиентном поле, обрабатывались дважды – с поправкой на диффузию и без нее. Результаты сравнивались с данными, полученными в однородном поле, которые в этом случае принимаются за эталон.

Наиболее точное восстановление спектров времен поперечной релаксации происходит в том случае, когда спектр имеет максимальные времена релаксации до 1000 мс (рис. 4, а). В случаях с более длинными максимальными временами (рис. 4, б) спектры также могут быть хорошо восстановлены, однако ошибки при этом могут возрастать. Это объясняется тем, что существенная нелинейность зависимости зарегистрированного времени T_2 от истинного вносит значительную неоднозначность при определении максимального времени релаксации в спектре. При этом имеет место незначительное смещение положения мод спектра, восстановленного по данным, зарегистрированным в градиентном магнитном поле с помощью введения поправки относи-

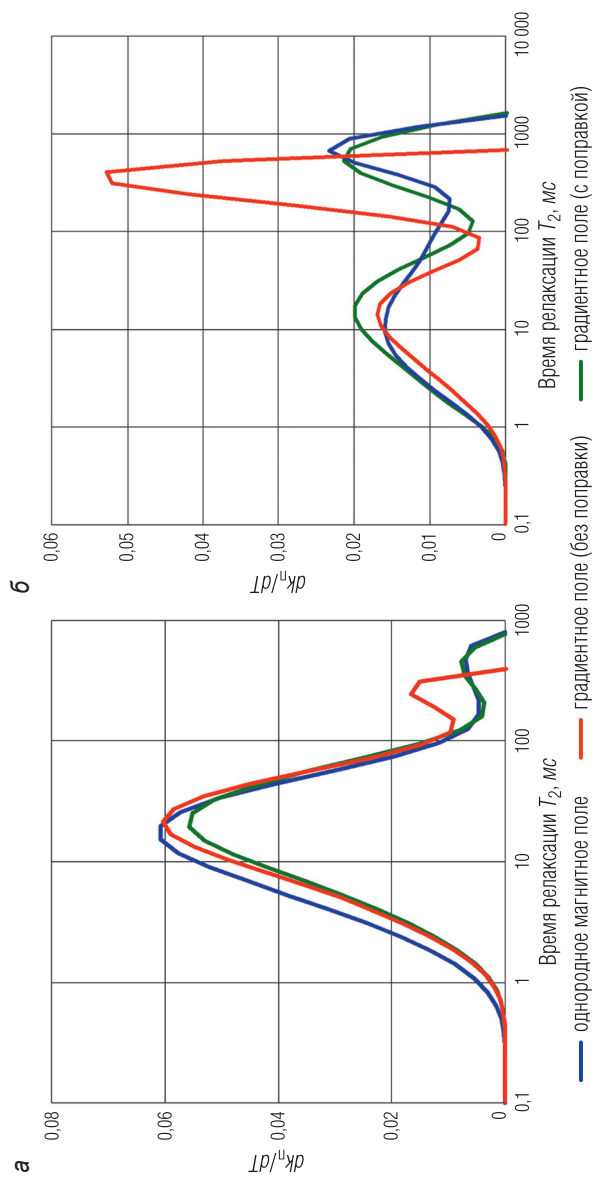


Рис. 4. Образец керна с короткими временами релаксации до 1000 мс (а) и с длинными временами релаксации более 1000 мс (б)

тельно спектра, принятого за истинный (полученного в однородном магнитном поле). Однако это не сказывается на определении общей пористости, так как интегрально во всех случаях спектр соответствует зарегистрированной релаксационной кривой, амплитуда которой соответствует общей пористости исследуемого образца.

На рис. 5 приведены значения зарегистрированных и восстановленных времен релаксации для исследованных образцов керна. Видно, что полученные результаты соответствуют теоретической зависимости. В целом, исследования на керне продемонстрировали хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов при определении спектров по данным ЯМР в градиентном магнитном поле. Доказана работоспособность предложенной методики.

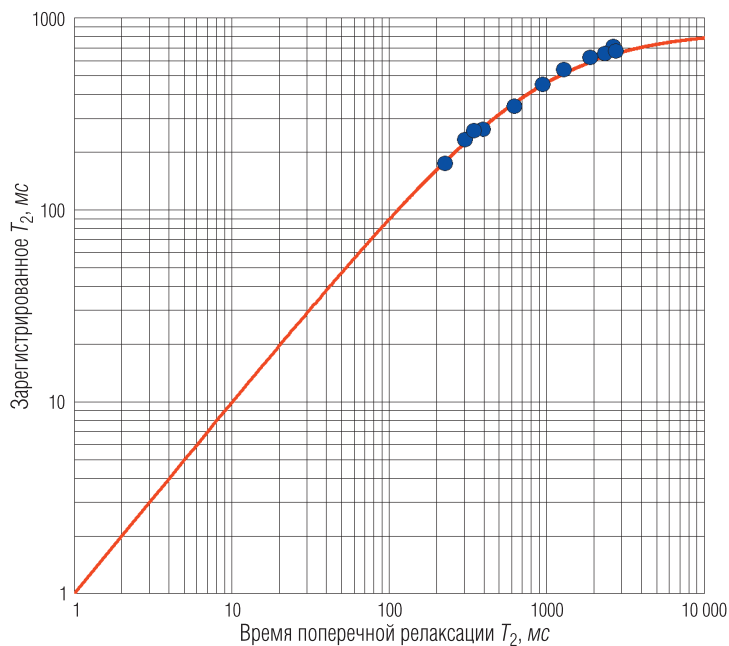


Рис. 5. Восстановление времен поперечной релаксации T_2 на образцах керна

Выводы

В работе рассмотрены механизмы влияния градиента магнитного поля на результаты ЯМР-исследований и предложены новые подходы к обработке первичных данных. Исследования на модельных примерах показали работоспособность предлагаемых алгоритмов и позволили оценить возможные ошибки, возникающие в процессе обработки данных ЯМР. Исследования с использованием кернового материала также подтвердили все результаты теоретических исследований и моделирования. Описанный механизм введения поправок в настоящее время успешно применяется в ООО “Нефтегазгеофизика” при обработке скважинных материалов ЯМК с использованием программного комплекса NMR Processor.

Авторы работы выражают благодарность сотрудникам ООО “Арктик-ГЕРС” и НПЦ “Тверьгеофизика” за предоставленный для исследований керновый материал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксельрод С. М., Неретин В. Д. Ядерный магнитный резонанс в нефтегазовой геологии и геофизике. М.: Недра, 1990. 192 с.
2. Джордж Р. Коатес, Ли Чи Хиао, Манфред Д. Праммер. Каротаж ЯМР. Принципы и применение. Хьюстон: Halliburton Energy Services, 1999. 335 с.
3. Иванов Ю. Л., Митюшин Е. М., Барляев В. Ю. и др. ЯМР-релаксометр для анализа свойств кернов горных пород, шлама и флюидов // Труды Всероссийской научно-практической конференции “Состояние и перспективы развития ядерно-магнитных методов исследования нефтегазовых и рудных скважин, каменного материала и флюидов”. Тверь, 2011. С. 278–290.
4. 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. Т. 1. С. 43–50.
5. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.

*Доклад на Всероссийской научно-практической конференции
“Ядерная геофизика – 2014”.*