

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЯМР-ХАРАКТЕРИСТИК ОТ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕСЧАНО-АЛЕВРИТОГЛИНИСТЫХ ОБРАЗЦОВ

М.И. Шумскайте¹, В.Н. Глинских^{1,2}

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

По результатам лабораторных экспериментов на ЯМР-релаксметре МСТ-05 установлена зависимость ЯМР-характеристик от удельной поверхности и удельного электрического сопротивления водонасыщенных песчано-алевритоглинистых образцов керна. Оценка влияния количества и типа глинистых минералов проведена при остаточном водонасыщении, поскольку в этом случае глинистостью определяется основной вклад в измеряемый ЯМР-сигнал. По данным ЯМР-релаксометрии получены количественные оценки удельной поверхности, характеризующейся глинисто- и капиллярно-связанными флюидами. Установлены значения поверхностной релаксивности по данным методов тепловой десорбции и ЯМР-релаксометрии, высокая степень достоверности которых подтверждается согласованием распределений пор по размерам, полученным по результатам ЯМР-релаксометрии, капиллярметрии и гранулометрии. Выявлены связи параметров ЯМР-спектров с удельной поверхностью и удельным электрическим сопротивлением, которые зависят от поверхностных свойств как глинистых, так и песчано-алевритовых частиц.

Ядерный магнитный резонанс, релаксометрия, глинистые минералы, удельная поверхность, поверхностная релаксивность, удельное электрическое сопротивление.

RELATION OF NMR PARAMETERS WITH SPECIFIC SURFACE AND RESISTIVITY OF SHALY SANDSTONE AND SILTSTONE SAMPLES: EXPERIMENTAL STUDY

M.Y. Shumskayte and V.N. Glinskikh

Using an MST-05 NMR relaxometer, we determined the dependence of NMR parameters on the specific surface and resistivity of water-saturated shaly sandstone and siltstone core samples. The influence of the type and quantity of clay minerals was evaluated at residual water saturation, because the main contribution to the measured NMR signal in this case is made by clay content. Based on NMR relaxometry data, we obtained quantitative estimates of the specific surface with clay- and capillary-bound fluids. The surface relaxivity was estimated from thermal-desorption and NMR relaxometry data. The high degree of reliability of its values was confirmed by the agreement between the pore size distributions determined by NMR relaxometry and by capillarimetry and granulometry. We have established that the parameters of NMR spectra depend on the specific surface and resistivity, which are, in turn, a function of the surface properties of both clay and sandstone/siltstone particles.

Nuclear magnetic resonance, relaxometry, clay minerals, specific surface, surface relaxivity, resistivity

ВВЕДЕНИЕ

Импульсная ЯМР-релаксометрия является одним из эффективных методов лабораторных исследований петрофизических характеристик пород-коллекторов. Этот метод позволяет экспрессно и без механического воздействия получать качественную и количественную информацию о структуре порового пространства изучаемой геологической среды. Это способствовало тому, что за последние два десятилетия лабораторные ЯМР-методы, такие как спектрометрия, релаксометрия и рентгеновская томография, получили широкое распространение при петрофизических исследованиях керна нефтяных и газовых месторождений [Галкин и др., 2015].

Одними из основных параметров, определяемых методом ЯМР-релаксометрии, являются эффективная пористость и доли свободного и связанного флюида. Как известно, количество и тип глинистых минералов оказывают существенное влияние на ЯМР-сигнал, обусловленный содержанием глинисто-

связанной воды, поэтому интерпретация результатов, полученных на образцах керн с увеличенной долей глинистой фракции, приводит к погрешности в определении основных петрофизических параметров [Аксельрод, Неретин, 1990; Коатес и др., 2001; Джафаров и др., 2002]. Некоторые исследователи влиянием глинистой компоненты пренебрегают, считая вклад от нее на уровне шума измерения [Кенуон, 1992]. Для уменьшения погрешности, как правило, используется интерпретационная модель изучаемых образцов с учетом их литологических и петрофизических характеристик [Peveraro, Thomas, 2010; Chen et al., 2012]. При этом практически нет работ, посвященных количественной оценке влияния глинистости, его учету и анализу способов обработки ЯМР-сигнала при изучении заглинизированных образцов керн.

ЯМР-ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВЛИЯНИЯ ГЛИНИСТОСТИ

Для выявления зависимости характеристик ЯМР-спектров от удельной поверхности и удельного электрического сопротивления проведены эксперименты на коллекции образцов с разными петрофизическими характеристиками и разным типом и содержанием глинистой компоненты. Характеристики ЯМР-спектров (далее ЯМР-характеристики) определялись на ЯМР-релаксметре МСТ-05; удельная поверхность измерялась методом тепловой десорбции аргона и рассчитывалась по методу БЭТ (Брунауэра–Эммета–Теллера); удельное электрическое сопротивление измерялось 2-электродным методом. Эксперименты проводились при 100 %-м и остаточном водонасыщении, полученном при центрифугировании на центрифуге РС-6 на скорости 6000 об/мин в течение 45 мин. Измерение ЯМР-характеристик состоит из двух этапов: регистрация ЯМР-сигнала в виде релаксационной кривой, ее обработка и интерпретация.

Первый этап. Намагничивание образца, или поляризация магнитных моментов ядер водорода, осуществляется при его помещении в постоянное магнитное поле, что приводит к возникновению макроскопической намагниченности, направленной вдоль прикладываемого поля. Поворот вектора макроскопической намагниченности в поперечную плоскость осуществляется воздействием 90°-го импульса последовательности СРМГ (Carr-Purcell-Meiboom-Gill). Последующее использование серии 180°-х импульсов приводит к возникновению спиновых эхо, огибающая которых – исследуемая релаксационная кривая. Ее начальная амплитуда соответствует ЭДС в приемной катушке после первого 90°-го импульса и пропорциональна количеству ядер водорода в исследуемом образце, которое в последующем пересчитывается в общую ЯМР-пористость [Коатес и др., 2001; Venkataramanan et al., 2014].

Второй этап. Обработка и интерпретация релаксационной кривой заключаются в обратном преобразовании ЯМР-сигнала в распределение времен поперечной релаксации (T_2), которое характеризует распределение пор по размерам полностью флюидонасыщенной породы [Денисенко, 2012]. Как известно, это преобразование сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода

$$\int_{T_{2\min}}^{T_{2\max}} e^{-\frac{t}{T_2}} z(T_2) dT_2 = f(t),$$

где T_2 , $T_{2\min}$ и $T_{2\max}$ – время поперечной релаксации, его минимальное и максимальное значения, t – время воздействия постоянного магнитного поля, $z(T_2)$ – функция дифференциального распределения амплитуд сигнала по временам поперечной релаксации, $f(t)$ – ЯМР-сигнал. Традиционно решение обратной задачи осуществляется методом регуляризации Тихонова. В последующем интерпретация сводится к получению информации о структуре порового пространства, включая емкостные и порометрические характеристики образцов керн.

Для получения релаксационной кривой, обеспечивающей высокую степень достоверности результатов обработки, решающее значение имеет выбор оптимальных параметров импульсной последовательности. К ним относятся расстояние между эхо-импульсами (TE), количество эхо-импульсов (N_b), время поляризации (T_w) и количество эхо-последовательностей (N). TE задается минимально возможным для регистрации сигнала от самых мелких пор и фракций с короткими временами поперечной релаксации (глинисто-связанный флюид). Экспериментально установлено, что для ЯМР-релаксметра МСТ-05 оптимальное значение параметра TE составляет 0.2 мс [Доломанский, Муравьев, 2010]. Его увеличение целесообразно только в том случае, если при максимальном N_b сигнал, описывающийся релаксационной кривой, затухает не полностью. Для получения данных о крупных порах и фракциях с большими временами поперечной релаксации значение T_w должно быть в 3–5 раз больше максимального времени поперечной релаксации, чтобы все ядра водорода поляризовались. N_b выбирается таким образом, чтобы обеспечить затухание, необходимое для завершения процесса релаксации при заданном значении TE [Иванов, Сошин, 2013].

В качестве примера рассмотрим значения параметров ЯМР-эксперимента при 100 %-м и остаточном водонасыщении для типичного терригенного образца – нижнемеловой песчаник мелкозернистый с

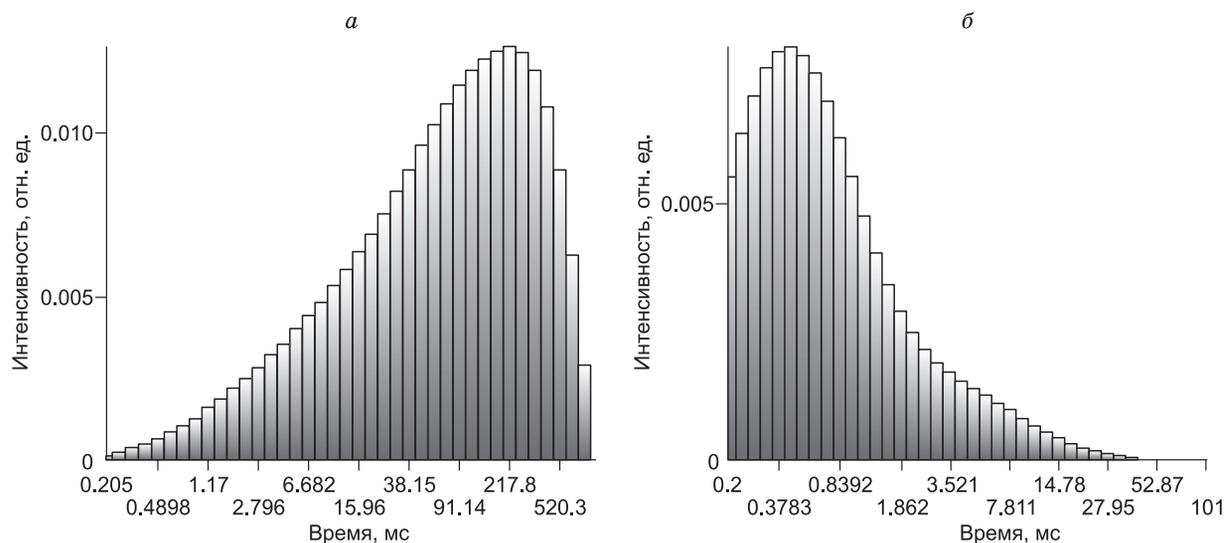


Рис. 1. Распределение по временам поперечной релаксации при 100 %-м (а) и остаточном (б) водонасыщении.

глинистым цементом порового типа, распределенным равномерно по образцу и представленным глинистым материалом хлорит-каолинитового и гидрослюдистого состава. Остаточная водонасыщенность достигалась путем центрифугирования образца зерна в течение 45 мин при скорости вращения ротора центрифуги 6000 об/мин. Для того чтобы сопоставить результаты ЯМР-измерений при 100 %-м и остаточном водонасыщении требуется задать одно значение TE в обоих случаях, что позволит зарегистрировать сигнал от одних и тех же пор – 0.2 мс. Остальные параметры задаются для каждого измерения отдельно таким образом, чтобы получить релаксационную кривую, обеспечивающую достоверность результатов обработки. Для рассматриваемого образца при 100 %-м насыщении $N_b = 400$, $T_w = 200$ мс, $N = 500$, а при остаточном – $N_b = 150$, $T_w = 200$ мс, $N = 400$. Значение N выбирается таким, чтобы отношение сигнал/шум было максимальным при оптимальном времени эксперимента. Время регистрации релаксационной кривой определяется как произведение TE и N_b и составляет 82.0 с при 100 %-м насыщении и 30.8 с при остаточном. Полученные при таких параметрах релаксационные кривые характеризуются высоким отношением сигнал/шум. Распределение по временам поперечной релаксации, полученное в результате математической обработки релаксационной кривой, показывает, что при 100 %-м насыщении водой заполнено все поровое пространство, при остаточном насыщении – та часть порового пространства, где вода удерживается капиллярными силами и связана с глиной (рис. 1).

На диаграмме (см. рис. 1) видно, что при остаточном водонасыщении спектр смещается в сторону коротких времен поперечной релаксации, указывая на вытеснение воды из крупных пор в процессе центрифугирования. Данные спектры характеризуют распределение остаточной воды в поровом пространстве, основная часть которой находится в глинисто-связанном состоянии.

Рассмотрим два образца, представленных мелкозернистыми песчаниками с коэффициентами пористости 19.6 и 20.6 %, содержанием глины 5.5 и 35.0 % и коэффициентами проницаемости 617 и 6 мД соответственно. В зависимости от объемного содержания глинистой фракции амплитуда, ширина и смещение спектров при 100 %-м и остаточном водонасыщении будут разными (рис. 2).

На графиках (см. рис. 2) видно, что при низком содержании глинистой фракции ЯМР-спектр при остаточном водонасыщении существенно смещается в сторону коротких времен поперечной релаксации, амплитуда спектра уменьшается. При высоком содержании глины спектры при 100 %-м и остаточном водонасыщении практически не смещаются относительно друг друга, амплитуда также не меняется. Это указывает на то, что в первом образце много свободной воды, которая удаляется при центрифугировании, а во втором ее нет, так как вся вода удерживается в порах за счет глины.

СВЯЗЬ ГЛИНИСТОСТИ И УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Удельная поверхность образцов зерна является одной из характеристик, которой определяется количество связанного флюида. Для песчаных образцов зерна величина удельной поверхности зависит преимущественно от количества и типа глинистых минералов, входящих в состав горной породы, и в меньшей степени от размера самих частиц образца.

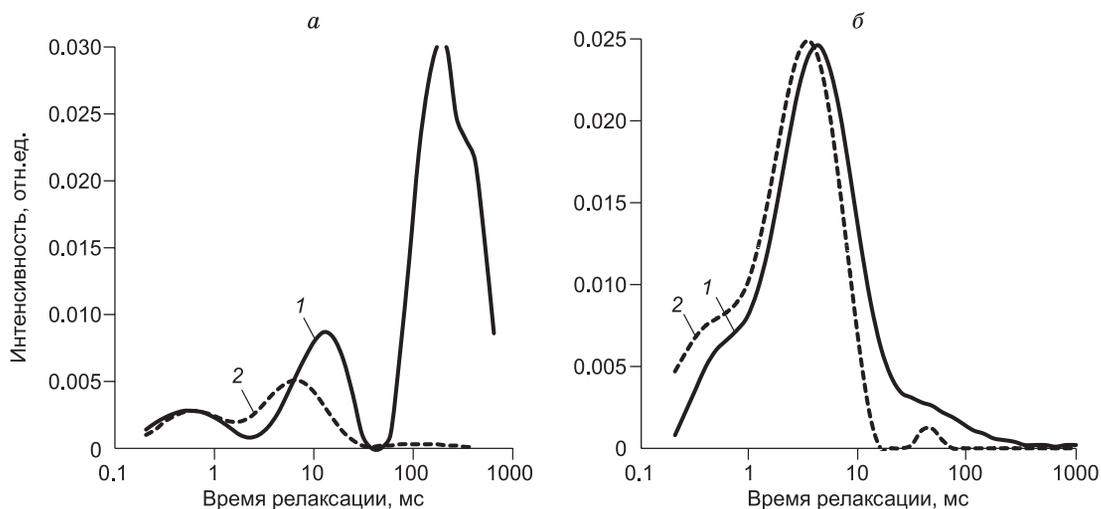


Рис. 2. Распределение по временам поперечной релаксации при 100 %-м (1) и остаточном (2) водонасыщении для образцов с содержанием глины 5.5 % (а) и 35 % (б).

Как известно, в терригенных коллекторах в основном присутствуют следующие типы глинистых минералов: каолинит, хлорит и гидрослюда. Каолинит распределяется в виде дискретных частиц размером 10–20 мкм. Хлорит выстилает поры частицами размером 1–2 мкм и обладает большей удельной поверхностью по сравнению с частицами каолинита. У гидрослюдистых минералов, закупоривающих поры, удельная поверхность либо соизмерима с частицами хлорита, либо больше. Одним из наиболее распространенных типов распределения глинистых частиц в породе является рассеянный (дисперсный), образующийся вследствие осаждения и преобразования глин уже накопившегося осадка. Данный тип распределения глины значительно снижает проницаемость породы, увеличивая при этом ее водоудерживающую способность за счет адсорбционных свойств глины [Тиаб, Доналдсон, 2009].

Авторами проведена оценка объемного содержания глины на основе анализа значений эффективной ЯМР-пористости, характеризующей долю суммарного связанного флюида, зависящую от количества глины. Однако ее величина также существенно зависит и от типа глинистых минералов. Экспериментальные данные показывают, что при одинаковом значении эффективной ЯМР-пористости определяемое содержание глины будет разным в зависимости от преобладающего типа глинистого минерала. Это связано с тем, что для удержания равного количества глинисто-связанного флюида требуется большее количество каолинитовой и меньшее хлоритовой глины из-за высокой удельной поверхности последней, что обусловлено размерностью глинистых частиц и удерживающими свойствами их поверхности.

В работе удельная поверхность определялась методом тепловой десорбции аргона и по данным ЯМР-релаксометрии. В последнем случае удельная поверхность связана с временем поперечной релаксации выражением

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{S}{V}, \quad (1)$$

где T_2 – время поперечной релаксации, S/V – удельная поверхность, ρ – поверхностная релаксивность, определяющая интенсивность релаксационных процессов, происходящих вблизи поверхности твердой фазы [Straley et al., 1997]. С увеличением доли глинистости и соответственно удельной поверхности ρ уменьшается.

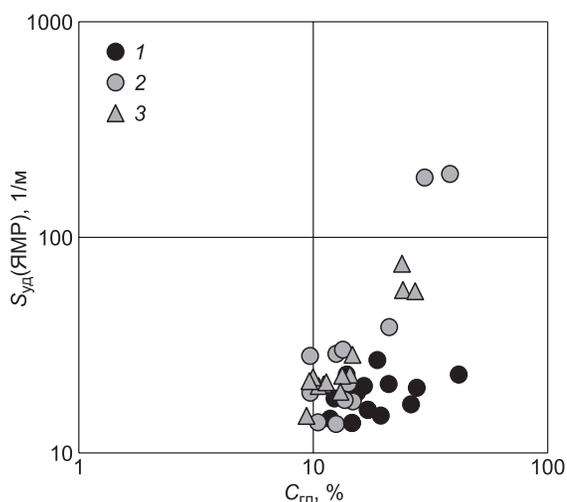
Данная зависимость справедлива только при условии полного флюидонасыщения породы. Поскольку влияние глинистости, а значит, и оценка удельной поверхности рассматриваются при остаточном водонасыщении, эта формула преобразована в приближении отсутствия свободного флюида в образце. С точки зрения метода ЯМР поверхностные свойства описываются глинисто-связанным флюидом, а объемные – капиллярно-связанным, поэтому удельную поверхность можно представить соотношением

$$\frac{S}{V} = \frac{CBW}{BVI}, \quad (2)$$

где CBW – глинисто-связанный флюид, BVI – капиллярно-связанный флюид.

Рис. 3. Зависимость удельной поверхности, рассчитанной по данным ЯМР-релаксометрии, от глинистости для трех групп образцов керна.

1 – песчаник с каолинитом, 2 – песчаник с хлоритом, 3 – алевролит с хлоритом.



На основе детального анализа полученных нами с использованием соотношения (2) экспериментальных данных по удельной поверхности ($S_{уд}$) и глинистости ($C_{гд}$) выделены три группы образцов (рис. 3). Первая представлена песчаниками с коэффициентом пористости 20–44 % со средним значением 28 %, в составе глинистой фракции преобладает каолинит, ее содержание составляет 5–47 % со средним значением 19 %. Вторая аналогична первой группе, но в составе глинистой фракции преобладает хлорит. Третья – алевролиты с коэффициентом пористости 14–19 % со средним значением 16 %, в составе глинистой фракции преобладает хлорит, ее содержание 8–21 % со средним значением 12 %.

Для всех групп типично увеличение удельной поверхности с увеличением глинистости. В песчаниках с каолиновой глиной удельная поверхность слабо меняется с ростом глинистости. Это связано с тем, что частицы каолинита, распределенные дискретно, составляют часть матрицы породы вместе с частицами самого песчаника и обладают низкой удельной поверхностью, поэтому увеличение количества глины не приводит к существенному изменению удельной поверхности. В алевролитах с хлоритовой глиной изменение удельной поверхности происходит быстрее (при увеличении содержания глины в два раза в первом случае удельная поверхность возрастает в 1.2 раза, во втором – почти в 4 раза), что связано с поверхностными свойствами как глинистых, так и самих частиц алевролита, обладающих высокой удельной поверхностью. Группа песчаников с каолинит-хлоритовой глиной является промежуточной и также характеризуется существенным увеличением удельной поверхности с изменением глинистости, что, в первую очередь, связано с наличием хлоритовой составляющей в глинистой фракции.

Таким образом, показано, что тип глины оказывает большее влияние на удельную поверхность, так как значения $S_{уд}$ не перекрываются для разных типов глины (см. рис. 3). При этом следует учитывать, что в алевролитах не меньшее влияние также оказывают и поверхностные свойства частиц образца.

ОЦЕНКА ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕЛАКСИВНОСТИ ЧЕРЕЗ УДЕЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Удельная поверхность образцов керна при 100 %-м водонасыщении определяется по ЯМР-данным с использованием формулы (1). В этой формуле значение поверхностной релаксивности ρ оценивается для каждого образца по удельной поверхности, полученной методом тепловой десорбции аргона.

Выполненные исследования на 14 образцах керна, представленных песчаниками мелкозернистыми и алевролитами крупнозернистыми с коэффициентами пористости в диапазоне 6–17 % со средним значением 10 %, проницаемости – 0.01–1.95 мД со средним значением 0.44 мД, показывают, что поверхностная релаксивность ρ меняется в пределах от 0.003 до 0.062 мкм/мс. Хорошее согласование результатов определения удельной поверхности по тепловой десорбции аргона и по данным ЯМР наблюдается при использовании среднего значения ρ в каждом из диапазонов: 0.003–0.006; 0.01–0.015; 0.038–0.062 (рис. 4).

Таким образом, по значениям удельной поверхности, полученным методом тепловой десорбции аргона, вычислены значения поверхностной релаксивности, необходимые при пересчете распределения времен поперечной релаксации в распределение пор по размерам в приближении идеализированного порового пространства для сферических пор [Архипов, Скирда, 2013; Кислицын и др., 2014; McCarney et al., 2015]:

$$\frac{3}{r} = \frac{1}{T_2 \rho}. \quad (3)$$

Распределение пор по размерам, восстановленное из ЯМР-спектров, сопоставлялось с распределением пор по размерам, полученным методами капилляр- и гранулометрии. В первом случае по результатам ЯМР-измерений в процессе центрифугирования дискретное распределение пор по размерам

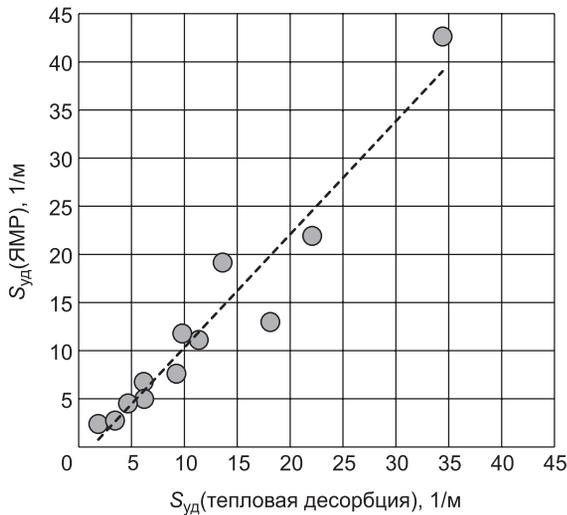


Рис. 4. Значения удельной поверхности по данным тепловой десорбции и ЯМР-релаксометрии.

восстанавливается с хорошей точностью для всех пор. К ним относятся как преимущественно мелкие поры (менее 1 мкм), в которых большая часть флюида находится в связанном состоянии и не удаляется при центрифугировании (6000 об/мин в течение 45 мин), так и поры более крупного размера, в которых присутствует свободный и связанный флюид. Для данных гранулометрии также получено дискретное распределение (рис. 5). Распределение пор по размерам, полученное методами капилляр- и гранулометрии, приведено для песчаника мелкозернистого и алевролита крупнозернистого с коэффициентами пористости 23.4 и 12.2 % соответственно.

При сопоставлении данных ЯМР и капиллярметрии на диаграмме (см. рис. 5, а) видно хорошее согласование на всем интервале определения размера пор.

При сопоставлении с результатами гранулометрии (см. рис. 5, б) анализ данных в области меньше 10 мкм некорректен, поскольку при таких радиусах зерен и поровых каналов ЯМР-релаксометрия и гранулометрический анализ обусловлены различными процессами. Гранулометрия характеризует непосредственно размер самих частиц, а ЯМР – расстояние между этими частицами и плотность их упаковки, зависящие от взаимодействия частиц между собой и с флюидом. Сопоставление данных этих методов возможно только при условии соразмерности радиусов зерен и поровых каналов и достаточного их размера.

Следует отметить, что рассмотренные примеры (см. рис. 5) справедливы для идеальных моделей сферических и цилиндрических пор. В реальных же горных породах поры произвольного размера, что значительно усложняет интерпретацию полученных данных. С этим связаны основные различия в распределениях пор по размерам, полученных методами ЯМР, капиллярметрии и гранулометрического анализа.

Таким образом, по результатам сопоставления удельной поверхности, определенной методами тепловой десорбции и ЯМР-релаксометрии, получена оценка поверхностной релаксивности, которая является важнейшей характеристикой при пересчете распределения времен поперечной релаксации в распределение пор по размерам. Показано согласование распределения пор по размерам, полученного по данным ЯМР-релаксометрии, капилляр- и гранулометрии.

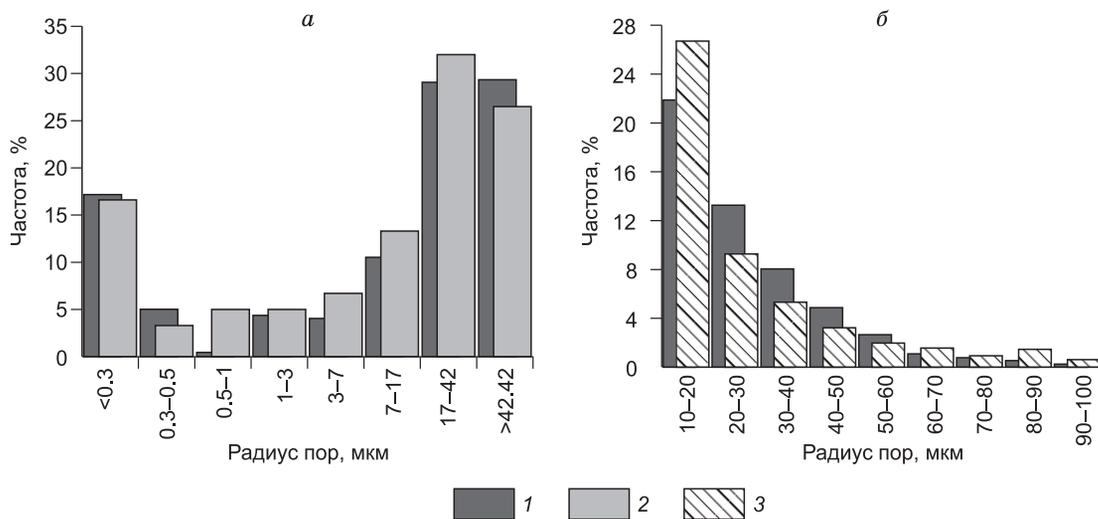


Рис. 5. Распределение пор по размерам по данным ЯМР-релаксометрии (1), капилляр- (2) и гранулометрии (3).

а, б — описание см. в тексте.

ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ГЛИНИСТОСТИ

Традиционно зависимость удельного электрического сопротивления (УЭС) от петрофизических параметров насыщенных песчаников описывается общеизвестным уравнением Дахнова–Арчи. Эта основополагающая эмпирическая зависимость ограничивается только «чистыми» песчаниками с непроводящим скелетом и не учитывает глинистость, наличие которой изменяет структуру порового пространства, приводя к уменьшению коэффициента пористости, что существенно влияет на УЭС породы в целом. При определенной минерализации насыщающего образец флюида и при наличии глины известная зависимость УЭС от коэффициента пористости может иметь обратный характер [Liu et al., 2015].

Исследование влияния глинистости ($C_{гн}$) и удельной поверхности ($S_{уд}$), определенным по данным ЯМР-релаксометрии, на значение УЭС проводилось при остаточном водонасыщении образцов керна. Они представлены мелко- и среднезернистыми песчаниками и алевритами, им свойственны коэффициенты пористости 14–44 % со средним значением 24 % и глинистости 5–47 % со средним значением 17 %. В состав глины входят каолинит и хлорит с незначительными примесями гидрослюда и смешанослойных соединений. Анализ полученных результатов показал, что увеличение глинистости сопровождается увеличением доли пор, характеризующих объем суммарно связанного флюида, приводя к уменьшению УЭС. Выявленная зависимость УЭС от глинистости характеризуется высоким коэффициентом корреляции ($R^2 > 0.9$) и справедлива как для низко-, так и для высокоомных образцов (рис. 6). На этом графике видно, что для образцов с увеличенной долей глинистой фракции уравнение Дахнова–Арчи имеет ограничения.

Также установлена связь УЭС и удельной поверхности как следствие зависимости, представленной на рис. 6. Для количественной оценки влияния типа глинистых минералов на УЭС необходимы дополнительные исследования, которые будут проведены в дальнейшем.

Полученные результаты позволяют учитывать глинистость и оценивать ее влияние на УЭС в петрофизических моделях, используемых при интерпретации данных электромагнитного каротажа [Глинских и др., 2014].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено экспериментальное исследование зависимости ЯМР-характеристик от удельной поверхности и удельного электрического сопротивления на песчано-алевритоглинистых образцах терригенных пород-коллекторов Западной Сибири. Оценка содержания глинистой компоненты по результатам ЯМР-измерений выполнена при остаточном водонасыщении, при котором вклад глинисто-связанного флюида в суммарный связанный является основным.

По данным ЯМР-релаксометрии получена оценка удельной поверхности, установлены и детально изучены ее связи с глинистостью и удельным электрическим сопротивлением песчано-алевритовых образцов терригенных пород-коллекторов. Показано, что в алевритовых образцах керна на значение удельной поверхности оказывают влияние не только количество и тип глины, но и размер, и свойства алевритовых частиц образца, которые определяют количество глинисто- и капиллярно-связанного флюида.

Проведена оценка поверхностной релаксивности с использованием данных об удельной поверхности, определенной по методу тепловой десорбции, что позволило определить распределение пор по размерам по данным ЯМР-релаксометрии. Полученное распределение пор по размерам хорошо согласуется с результатами капиллярно- и гранулометрии.

Установлено, что удельная поверхность, обусловленная свойствами как глинистых, так и песчано-алевритовых частиц, связана с количеством глинисто- и капиллярно-связанного флюида, определенных по данным ЯМР-релаксометрии, которое, в свою очередь, влияет на величину удельного электрического сопротивления.

Полученные результаты указывают на целесообразность выполнения измерений удельной поверхности стандартными методами и методом ЯМР-релаксометрии на модели пористой среды с известными параметрами (кварцевые порошки) и

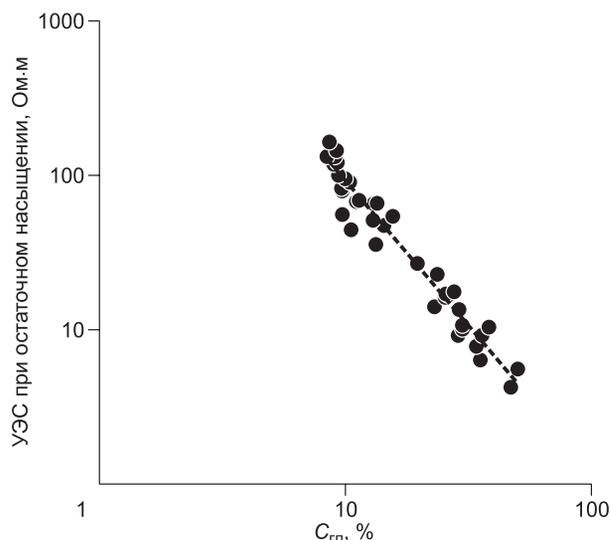


Рис. 6. Зависимость УЭС при остаточном водонасыщении от глинистости.

сопоставления полученных результатов для выявления зависимости поверхностной релаксивности от диаметра частиц. Эти исследования позволят определить значение поверхностной релаксивности и точнее оценить удельную поверхность по данным ЯМР-релаксометрии. Для уточнения количественных оценок глинистости требуется провести измерения ЯМР-спектров образцов глины различных типов, а также смеси глин и кварцевых порошков как модели заглинизированных пород-коллекторов.

ЛИТЕРАТУРА

Аксельрод С.М., Неретин В.Д. Ядерный магнитный резонанс в нефтегазовой геологии, геофизике. М., Недра, 1990, 192 с.

Архипов Р.В., Скирда В.Д. Применение метода ядерно-магнитного резонанса для исследования структуры порового пространства в условиях фильтрации // Нефтяное хозяйство, 2013, № 6, с. 64–67.

Галкин С.В., Ефимов А.А., Кривошеков С.Н., Савицкий Я.В., Черепанов С.С. Применение метода рентгеновской томографии при петрофизических исследованиях керна нефтяных и газовых месторождений // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (5), с. 995–1007.

Глинских В.Н., Нестерова Г.В., Эпов М.И. Моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа с использованием петрофизических моделей электропроводности // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (5-6), с. 1001–1010.

Денисенко А.С. Петрофизическое обеспечение ядерно-магнитного каротажа при разведке нефтегазовых месторождений // Каротажник, 2012, № 213, с. 66–82.

Джафаров И.С., Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Применение метода ядерного магнитного резонанса для характеристики состава и распределения пластовых флюидов. М., Химия, 2002, 439 с.

Доломанский Ю.К., Муравьев Л.А. Программное обеспечение ЯМР-релаксометра // Уральский геофизический вестник, 2010, № 1 (16), с. 33–39.

Иванов Ю.Л., Сошин С.С. Измерение времен поперечной релаксации на релаксометре «Экспо-Керн». Методы тестирования ЯМР-релаксометров // Каротажник, 2013, № 225, с. 199–205.

Кислицын А.А., Потапов А.Г., Зубков М.Ю., Пульдас Л.А. Исследование пористой среды с помощью ядерного магнитного резонанса // Вестн. Тюменского государственного ун-та. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2014, № 7, с. 58–67.

Коатес Дж.Р., Хяо Л.Ч., Праммер М.Д. Каротаж ЯМР. Принципы и применение. Перевод с англ. / Ред. П.Е. Сынгаевский. Хьюстон, Халлибуртон Энерджи Сервисез, 2001, 342 с.

Тиаб Д., Доналдсон Э.Ч. Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. М., ООО «Премиум Инжиниринг», 2009, 840 с.

Chen J.-H., Zhang J., Jin G., Quinn T., Frost E., Chen J. Capillary condensation and NMR relaxation time in unconventional shale hydrocarbon resources // Transactions of the SPWLA 53rd Annual logging symposium, 2012, <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-2012-186>.

Kenyon W.E. Nuclear magnetic resonance as a petrophysical measurements // Nuclear Geophysics, 1992, v. 6, № 2, p. 153–171.

Liu X., Diao Q., Li D., Zhao T., Sun J., Li G. Effect of pore geometries on Archie's exponents in tight sandy conglomerate // Transactions of the SPWLA 56th Annual logging symposium, 2015, <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-2015-V>.

McCarney E.R., Butler P.N., Taylor-Offord S., Arnot M.J., Hunter M.W., Lawrence M.J. Core plug nuclear magnetic resonance (NMR) analysis as a method to estimate permeability anisotropy // Transactions of the SPWLA 56th Annual logging symposium, 2015, <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-2015-U>.

Peevero R., Thomas E.C. Effective porosity: a defensible definition for shaly sands // Transactions of the SPWLA 51st Annual logging symposium, 2010, <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-2010-97677>.

Straley C., Rossini D., Vinegar H., Tutunjian P., Morriss C. Core analysis by low-field NMR // The Log Analyst, 1997, v. 38, № 2, p. 84–94.

Venkataramanan L., Gruber F.K., LaVigne J., Habashy T.M., Iglesias J.G., Anand V., Rampurawala M.A., Jain V., Heaton N., Akkurt R., Rylander E., Lewis R. New method to estimate porosity more accurately from NMR data with short relaxation times // Transactions of the SPWLA 55th Annual logging symposium, 2014, <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-2014-V>.