

Результаты исследований и работ ученых и конструкторов

УДК 553.98:554.72.02

*В. А. Мурцовкин
ООО "Нефтегазгеофизика"*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЯДЕРНО-МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СМАЧИВАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Предложена новая методика определения смачиваемости поверхности пор горных пород. В ее основе лежит капиллярно-решеточная модель пористой среды. Для реализации методики в качестве исходных данных используются спектры ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) и кривые капиллярного давления, полученные на исследуемых образцах горных пород. Приведены примеры практического использования предлагаемой методики для определения смачиваемости поверхности пор на образцах керна.

Ключевые слова: горные породы, пористая среда, смачиваемость, кривые капиллярного давления, спектры ЯМР.

Смачиваемость поверхности пор горных пород является важным физическим свойством коллектора, которое в значительной степени определяет процесс извлечения нефти из пласта. От нее зависят капиллярное давление, относительные фазовые проницаемости, а также коэффициент извлечения углеводородов. По этой причине тип

смачиваемости коллектора наряду с его фильтрационно-емкостными свойствами необходимо учитывать в проекте разработки месторождения.

В настоящее время в практике лабораторных исследований используют несколько методов определения смачиваемости твердых поверхностей. Применительно к пористым горным породам наиболее широкое распространение получили метод Амотта и метод Горного бюро США (USBM) [1, 8]. Тем не менее каждый из существующих методов не лишен определенных недостатков, что делает целесообразным продолжение поиска новых решений проблемы определения смачиваемости поверхности пор. Одним из направлений подобного поиска, в частности, являются работы, использующие для оценки смачиваемости эффект ЯМР-релаксации флюидов, заполняющих поры [10].

В данной работе рассмотрена еще одна новая возможность использования метода ЯМР для определения смачиваемости поверхности пор горных пород в лабораторных условиях. Чтобы понять суть предлагаемой методики, рассмотрим воображаемую ситуацию, когда на образце водонасыщенной горной породы проведены два измерения кривых капиллярного давления, то есть получены две зависимости капиллярного давления (P_k) от коэффициента водонасыщенности (k_b): первое – при идеальной смачиваемости поверхности пор, а второе – при ухудшенной смачиваемости.

Результаты подобных измерений схематически показаны на рис. 1, где кривая 1 соответствует идеальной смачиваемости, а кривая 2 – ухудшенной. В обоих случаях для того чтобы начался процесс вытеснения смачивающей жидкости из пор породы, к этой жидкости необходимо приложить внешнее давление, превышающее капиллярное в наиболее крупных порах. Поэтому для кривых 1 и 2 даже при $k_b \approx 1$ выполняется условие $P_k > 0$. Наибольшее значение P_k при любом k_b будет наблюдаться в случае идеальной смачиваемости (кривая 1).

При некотором произвольном значении коэффициента водонасыщенности k_{bs} кривым 1 и 2 (рис. 1) будут соответствовать разные давления вытеснения. Для рассматриваемых случаев идеальной и ухудшенной смачиваемостей эти давления, согласно формуле Лапласа, будут, соответственно, равны

$$P_{k.1s} = \frac{4\sigma}{\delta_s}, \quad (1)$$

Однако на практике рассмотренный выше метод определения смачиваемости горных пород не пригоден для использования без некоторых дополнительных процедур. Это связано с тем, что в наличии обычно имеется только кривая капиллярного давления, соответствующая неизвестной (ухудшенной) смачиваемости (рис. 1, кривая 2), а кривая капиллярного давления при идеальной смачиваемости (кривая 1) неизвестна. Отмывание поверхности пор с помощью различных растворителей и химических реагентов не гарантирует достижения идеальной смачиваемости. Одним из возможных путей решения этой проблемы является теоретический расчет кривой капиллярного давления при идеальной смачиваемости, основанный на использовании определенных модельных представлений о процессе вытеснения смачивающей жидкости из исследуемой пористой среды. Рассмотрим этот подход к описанию процесса дренажа жидкости из горной породы более подробно.

Важным фактором, определяющим процесс вытеснения жидкости из пористой среды, является характер распределения пор по размерам. Одним из наиболее эффективных методов получения такого распределения является метод ядерно-магнитного резонанса [2, 10]. Он основан на том, что метод ЯМР позволяет определять распределение объемов пор по временам поперечной T_2 (или продольной T_1) релаксации намагниченности жидкости, заполняющей поры. Типичный вид такого распределения, полученного методом ЯМР на образце горной породы, насыщенной водой, представлен на рис. 2, где Δk_{pi} – доля общей пористости k_p , соответствующая времени релаксации T_{2i} .

С другой стороны, известно, что время релаксации в каждой отдельной поре зависит от ее размера. Поэтому чтобы получить из спектра ЯМР распределение пор по размерам, необходимо знать связь между временем релаксации и размером пор. В работе [9] было показано, что для отдельной поры справедливо соотношение

$$T_2 = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{v}{s}, \quad (5)$$

где v – объем поры; s – площадь поверхности поры; ρ – поверхностная релаксационная активность, характеризующая способность поверхности поры вызывать релаксацию магнитных моментов ядер водорода. С помощью этого соотношения распределение пористости по временам релаксации, представленное на рис. 2, может быть преобразовано в распределение пор по размерам.

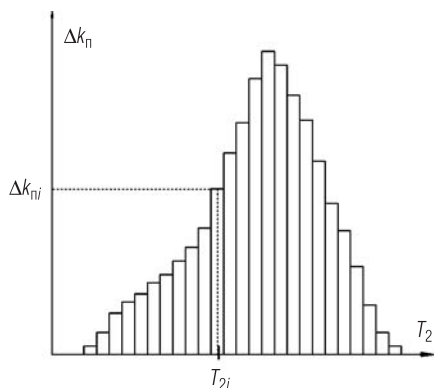


Рис. 2. Распределение пористости в образце горной породы по временам поперечной релаксации T_2

В свою очередь, зная подобное распределение, для описания петрофизических свойств горных пород можно воспользоваться капиллярно-решеточной моделью, возможности использования которой описаны в работах [3–5]. Такая модель представляет собой несколько разномасштабных трехмерных кубических решеток капилляров. Количество решеток определяется особенностями имеющегося реального распределения пор по размерам. Чтобы упростить понимание предлагаемой в настоящей работе методики определения смачиваемости, ограничим дальнейшее рассмотрение случаем одно-решеточной модели.

Такая модель представляет собой трехмерную кубическую капиллярную решетку. В свою очередь такую решетку можно представить состоящей из большого числа одинаковых по размеру кубических ячеек (рис. 3). При этом структура пор во всех ячейках также будет одинакова (в виде трех взаимно пересекающихся капилляров равного сечения), а отличие между ячейками будет заключаться лишь в размере соответствующих им капилляров. Распределение же размеров капилляров по ячейкам задается в соответствии с имеющимся распределением пор по размерам [6, 7], которое может быть получено для исследуемой горной породы методом ЯМР. Для упрощения расчетов считается, что капилляры имеют квадратное сечение. Размер всех ячеек, который обозначим через a , принимается равным максимальному размеру пор.

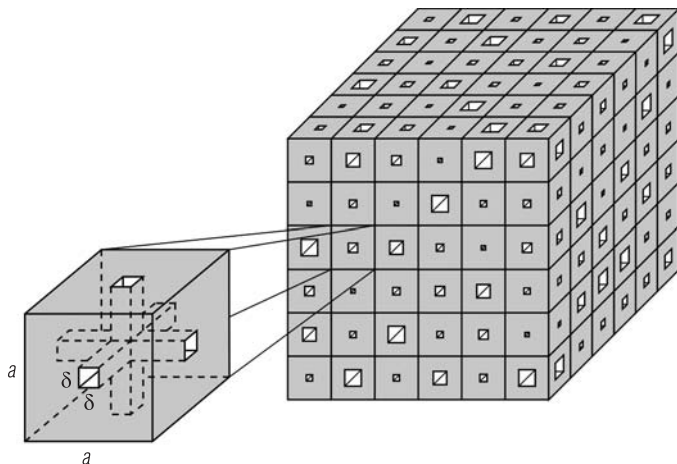


Рис. 3. Капиллярно-решеточная модель пористой среды

В работе [4] было показано, что для подобной модели в соответствии с формулой (5) можно считать, что

$$\delta_i \approx 4\rho T_{2i}, \quad (6)$$

где T_{2i} – время поперечной релаксации намагниченности жидкости в ячейке с размером капилляров δ_i . С помощью этого соотношения спектр ЯМР по T_2 , полученный для исследуемой породы, подобный приведенному на рис. 2, может быть преобразован в распределение пористости по размерам пор δ , которое и используется для расчета на основе модели конкретных петрофизических параметров породы.

Однако все это справедливо, если известна величина релаксационной активности поверхности пор ρ . Если же ρ не известна, то определить эту величину можно, измерив проницаемость породы. Для этого можно воспользоваться полученной в работе [6] на основе капиллярно-решеточной модели формулой для расчета проницаемости

$$k_{\text{пр}} = \frac{0,07}{a^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{(\delta_i \delta_j)^4}{\delta_i^4 + \delta_j^4} \Delta f_i \Delta f_j, \quad (7)$$

где

$$\Delta f_{i(j)} = a^3 \frac{\Delta k_{\pi i(j)}}{v_{i(j)}}, \quad (8)$$

где $v_{i(j)} = (3a - 2\delta_{i(j)})\delta_{i(j)}^2$ – объемы капилляров в i -й и j -й ячейках соответственно. Подставляя (6) в (7), находим

$$k_{\text{пр}} = 1,12\rho^2 T_{2n}^4 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\frac{(T_{2i} T_{2j})^2}{T_{2i}^4 + T_{2j}^4} \cdot \frac{\Delta k_{\pi i}}{3T_{2n} - 2T_{2i}} \cdot \frac{\Delta k_{\pi j}}{3T_{2n} - 2T_{2j}} \right]. \quad (9)$$

Измерив $k_{\text{пр}}$ и определив спектр ЯМР исследуемой породы, из этого уравнения можно найти величину релаксационной активности ρ . После этого, используя соотношение (6), можно перевести времена релаксации в соответствующие им размеры пор.

В результате этого, зная распределение пористости по размерам пор, можно с помощью модели построить теоретическую кривую капиллярного давления, соответствующую идеальной смачиваемости. Величину капиллярного давления при идеальной смачиваемости, то есть когда $\cos \theta_s = 1$, можно найти по формуле (1). А для расчета коэффициента насыщенности породы смачивающей жидкостью в работе [10] было получено выражение

$$k_{\text{вс}} = \frac{1}{k_{\pi}} \left(\sum_{i=1}^{s-1} \Delta k_{\pi i} + F_s^6 \sum_{i=s}^n \Delta k_{\pi i} \right), \quad (10)$$

где F_s – вероятность того, что размер капилляров δ_i в случайно выбранной ячейке будет удовлетворять неравенству $\delta_i < \delta_s$. В случае гидрофильных горных пород $k_{\text{вс}}$ представляет собой коэффициент водонасыщенности при давлении вытеснения P_s . Для F_s , согласно [7], справедливо выражение

$$F_s = \sum_{i=1}^{s-1} \Delta f_i. \quad (11)$$

Воспользовавшись формулами (1) и (10), можно построить теоретическую кривую капиллярного давления для идеально смачиваемой поверхности пор (рис. 1, кривая 1), а при наличии экспериментальной кривой капиллярного давления (кривая 2) по описанной выше методике можно получить распределение смачиваемости по размерам пор для исследуемой горной породы.

Для проверки работоспособности предлагаемой методики были выбраны два десятка образцов горных пород, отобранных с разных глубин при бурении скважин на четырех нефтегазовых месторождениях Западной Сибири. Величину проницаемости $k_{пр}$ для определения релаксационной активности ρ измеряли по фильтрации азота. Спектры ЯМР водонасыщенных образцов получали на релаксометре CoreSpec-1000. Капилляриметрию проводили до 12 атм.

Типичный пример кривых капиллярного давления, полученных на исследуемых образцах, приведен на рис. 4. Кривая 1 представляет собой результат ее расчета на основе капиллярно-решеточной модели по формулам (1) и (10) и соответствует идеальной смачиваемости поверхности пор, а кривая 2 – результат ее измерения при реальной смачиваемости. За исключением двух точек в области низких k_v , кривая 1, как и следовало ожидать, лежит чуть выше кривой 2.

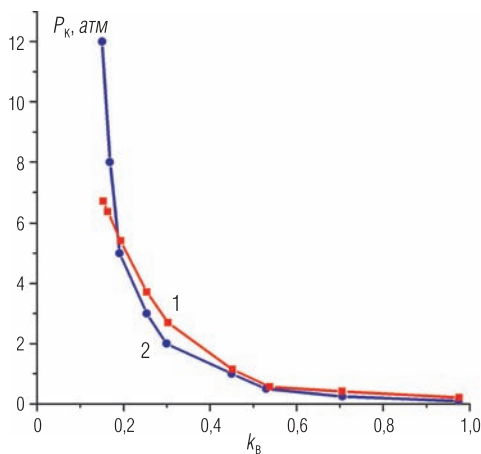


Рис. 4. Кривые капиллярного давления для образца горной породы:

1 – теоретическая зависимость, соответствующая идеальной смачиваемости; 2 – экспериментальная зависимость, соответствующая реальной смачиваемости

Воспользовавшись этими кривыми, можно с помощью формул (3) и (4) рассчитать распределение косинуса краевого угла смачиваемости по размерам пор. Результаты такого расчета представлены на рис. 5. Согласно представленным данным, смачиваемость поверхности пор

улучшается по мере уменьшения их размера. Наихудшей смачиваемости, наблюдаемой в крупных порах, соответствует $\cos \theta \approx 0,5$, что отвечает краевому углу смачивания 60° .

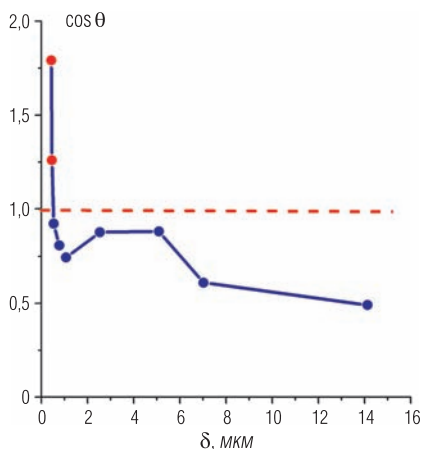


Рис. 5. Распределение косинуса краевого угла смачивания по размерам пор

Два значения $\cos \theta$ в области минимальных размеров пор превышают 1, что является некорректным результатом, поскольку допустимыми для функции косинуса являются значения $\cos \theta \leq 1$. Такое anomальное поведение найденного распределения в области малых пор имеет следующее объяснение.

Часть мелких пор в горной породе всегда контактирует с более крупными порами. В результате между ними постоянно происходит диффузионный обмен молекулами, содержащими релаксирующие ядра водорода. Поскольку в крупных порах процесс релаксации идет медленнее, то такой диффузионный обмен приводит к замедлению релаксации в мелких порах. Из-за этого сигнал ЯМР от таких пор смещается в область более длинных времен релаксации. Поэтому спектр ЯМР дает заниженные значения пористости в диапазоне мелких пор, что, в свою очередь, приводит к занижению теоретических значений k_v (рис. 4, кривая 1) по сравнению с экспериментальными (кривая 2) в этом диапазоне. Следствием этого и является завышение рассчитанных значений $\cos \theta$ для наиболее мелких пор.

В заключение можно сделать следующие выводы.

Рассмотренная методика позволяет проводить оценку смачиваемости поверхности пор в горных породах. Для реализации этой методики, наряду со стандартными данными петрофизических исследований, такими как проницаемость и кривые капиллярного давления, необходимо еще располагать спектрами ЯМР, полученными на водонасыщенных образцах породы.

Основой рассмотренной методики является капиллярно-решеточная модель, позволяющая проводить расчет петрофизических характеристик горных пород, используя спектры ЯМР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудок Н. С., Богданович Н. Н., Мартынов В. Г. Определение физических свойств нефтеводосодержащих пород. М.: Недра, 2007. 592 с.
2. Коатес Д. Р., Хиао Л. Ч., Праммер М. Д. Каротаж ЯМР. Принципы и применение. Хьюстон: Халибартон, 2001. 336 с.
3. Мурцовкин В. А. Мультирешеточная модель для расчета характеристик пористых сред. Расчет электропроводности // Коллоидный журнал. 2009. Т. 71. № 5. С. 677–684.
4. Мурцовкин В. А. Использование мультирешеточной капиллярной модели для расчета проницаемости по данным ядерно-магнитного резонанса // Коллоидный журнал. 2009. Т. 71. № 5. С. 685–692.
5. Мурцовкин В. А. Электропроводность пористых сред с двухфазным насыщением // Коллоидный журнал. 2013. Т. 75. № 1. С. 109–117.
6. Мурцовкин В. А. Примеры использования капиллярно-решеточной модели для расчета петрофизических характеристик горных пород // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2013. Вып. 3 (225). С. 177–192.
7. Мурцовкин В. А. Примеры использования капиллярно-решеточной модели горных пород с двухфазным насыщением для расчета их петрофизических характеристик // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2013. Вып. 8 (230). С. 74–93.
8. Тиаб Д., Дональдсон Э. Ч. Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. М.: ООО “Премиум Инжиниринг”, 2009. 838 с.
9. Brownstein K. R., Tarr C. E. Importance of Classical Diffusion in NMR Studies of Water in Biological Cells // Phys. Rev. A. 1979. V. 19. No. 6. P. 2446–2453.
10. Dunn K.-J., Bergman D. J., LaTorraca G. A. Nuclear Magnetic Resonance. Petrophysical and Logging Applications. Pergamon, 2002, 293 с.

Доклад на конференции “Ядерная геофизика – 2014”.