

Д.К. Нургалiev¹, В.Е. Косарев¹, В.М. Мурзакаев²,
М.С. Тагиров¹, В.Д. Скирда¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

²ООО «ТНГ-Групп», Бузульма

victor.kosarev@ksu.ru, Murza@tngf.tatneft.ru

К ВОПРОСУ О ПЕРСПЕКТИВАХ СОЗДАНИЯ СКВАЖИННОЙ АППАРАТУРЫ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА С ПОВЫШЕННЫМ ЗНАЧЕНИЕМ ГЛУБИННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе кратко обсуждаются возможности и перспективы создания аппаратуры ядерного магнитного каротажа с повышенным значением глубинности исследования. Для реализации указанной цели предлагается использовать достижения криогенных технологий. Представлены варианты возможных реализаций конструкции приборов.

Ключевые слова: ядерный магнитный каротаж, магнит, сверхпроводник, криоаккумулятор.

Ядерно-магнитный каротаж (ЯМК) является уникальным методом (Джордж, 1999; Джафаров, 2002; Губелин, 2001), позволяющим исследовать флюидные системы и насыщенные ими пористые среды. Это связано с тем, что основной измеряемый параметр ЯМК – индекс свободного флюида, определяющий объем свободной буровой жидкости, практически не зависит ни от полимиктовости отложений, ни от минерализации пластового флюида или промывочной жидкости. В настоящее время ЯМК является единственным геофизическим методом, который разделяет свободную и связанную воду, подвижную и вязкую нефть. Использование ЯМК открывает новые возможности в оценке свойств коллекторов, которые не может решать существующий комплекс геологических исследований скважин (ГИС).

В основе метода ЯМК лежит детектирование сигнала ЯМР (Абрагам, 1963) протонов от флюидов, содержащихся в прискважинной области. Принцип ЯМК в магнитном поле земли заключается в создании кратковременного магнитного импульса и регистрации времени возвращения протонов в исходное положение (время релаксации), которое может проявлять зависимость от размера пор. Так, малое время релаксации указывает на наличие мелких пор и низкую проницаемость, и наоборот. Это позволяет определить объем связанной воды (мелкие поры) и эффективную пористость (крупные поры). При применении данного метода ярко выражена связь проницаемости с эффективной пористостью, поэтому ЯМК является самым предпочтительным методом ГИС для оценки проницаемости.

Приборы ЯМК в сильном поле содержат в своем составе собственные магнитные системы. При этом явление ЯМР наблюдается во внешнем поле рассеяния постоянных магнитов, а возбуждение спиновой системы осуществляется мощными радиочастотными импульсами. Магнитное поле рассеяния характеризуется достаточно большим градиентом, что обеспечивает принципиальную возможность задавать параметр глубинности исследования прибора путем изменения частоты резонанса. В то же время, именно наличие градиента магнитного поля

приводит к существенному снижению уровня сигнала за счет ограничения размеров пространственной области, в которой возбуждается сигнал ЯМР.

В настоящее время на рынке геофизических услуг присутствует достаточно представительный набор различных приборов ядерного магнитного каротажа. Прежде всего, это комбинируемый прибор ЯМК CMR и сканер MRX компании «Schlumberger» (Комбинируемый прибор ЯМК CMR, сканер MRX [Электронный ресурс]); прибор многочастотного ЯМК MRIL компании Halliburton (Прибор многочастотного ЯМК MRIL [Электронный ресурс]); зонд MReX (MR-eXplorer) компании BakerHughes (Зонд MReX (MR-eXplorer) [Электронный ресурс]). Существуют и российские разработки, такие как аппаратный комплекс ядерно-магнитного каротажа ЯК-8, МАЯК (ЯК-9) ООО «ТНГ-Групп» (Аппаратный комплекс ядерно-магнитного каротажа ЯК-8, МАЯК (ЯК-9) [Электронный ресурс]), ЯМТК разработки ОАО «НПЦ «Тверьгеофизика» (Джафаров, 2002) и др.

Значения параметра глубинности приборов различных производителей лежат в диапазоне от 2 до 18 см при частотах резонанса на ядрах ¹H от нескольких сотен кГц до 2 МГц. Причем, чем выше частота резонанса, тем меньше значение параметра глубинности.

Несмотря на существенный прогресс в аппаратуре ЯМК нельзя не отметить присущую методу низкую чувствительность. Причем, это проблема является главным препятствием на пути увеличения глубинности исследования, так как с ростом расстояния от оси скважины значение магнитного поля магнита сильно убывает, что, вследствие сильной зависимости сигнала ЯМР от величины поляризирующего магнитного поля, приводит к катастрофическому падению сигнала. Дополнительная проблема заключается в необходимости создания достаточной большой амплитуды возбуждающего радиочастотного поля в области пространства, удаленной от передающей антенны прибора. В итоге для всех приборов ЯМК характерно невысокое значение параметра глубинности, которое, как правило, не превышает 30 см от осевой линии прибора, а в прижимных приборах может составлять всего несколько

сантиметров от поверхности ствола скважины или от внешней стенки прибора.

Совершенно очевидно, что приведенные характеристики приборов ЯМК в большинстве случаев не способны удовлетворить все возрастающие требования к качеству информации, получаемой в результате ядерно-магнитного каротажа. Указанный недостаток может быть устранен (либо уменьшен) оптимальным выбором магнитной системы, оптимизацией и использованием новейших конструктивных материалов в создании приемно-передающего тракта прибора ЯМК

Проблема увеличения параметра глубинности приборов ЯМК, прежде всего, требует решения задачи повышения отношения сигнал/шум. Это может быть достигнуто как за счет улучшения качества приемной системы, так и за счет оптимизации конфигурации магнитного поля. Первое предполагает применение всех возможных методов снижения коэффициента шума в приемном тракте прибора, вплоть до охлаждения предусилителя. Второе означает, что необходимо отдавать предпочтение таким конфигурациям магнитной системы, при которых в исследуемой зоне пространства будет минимизировано спектральное уширение сигнала за счет градиента магнитного поля.

Дальнейшая перспектива развития приборов ЯМК, по нашему мнению, неизбежно будет связана с потенциалом криотехнологий. Действительно, в случае использования постоянных магнитов предел создания напряженности магнитного поля определяется свойствами магнитного материала. Так, для самарий-кобальтовых магнитов максимальное достигнутое значение остаточной индукции не превышает 1,2 Тл. В то же время достижения в области создания магнитных систем на основе сверхпроводящих соленоидов поистине впечатляют. Сейчас считается уже средним уровнем, когда в аппаратуре ЯМР используются магниты с индукцией 7-11 Тл, что соответствует частотам резонанса на протонах 300-500 МГц.

В настоящее время на базе Казанского (Приволжского) федерального университета совместно с ООО «ТНГ-Групп» в рамках выполнения работ по реализации постановления правительства РФ №218 (проект 2010-218-01-192) выполняется конструкторская разработка и практическая реализация опытного образца прибора ядерно-магнитного каротажа в поле постоянного магнита с использованием криотехнологий. В данном случае коллектив разработчиков реализует все перечисленные подходы повышения качества прибора ЯМК с целью существенного увеличения параметра глубинности исследования прискважинной зоны.

Разработан комплект рабочей конструкторской документации прибора ЯМК по ГОСТ 2.103 для двух вариантов исполнения прибора ЯМК: с постоянными цилиндрическими магнитами (Рис. 1) с условным обозначением «ЯМК-1» и с магнитной системой на основе сверхпроводящего соленоида (Рис. 2) с условным обозначением «ЯМК-2».

В обоих вариантах магнитные системы выполнены в форме двух цилиндрических магнитов, магнитные полюса которых ориентированы вдоль оси прибора и направлены друг против друга. Приемно-передающие катушки (зондовая часть) расположены между магнитами, в зоне, в которой отсутствуют какие-либо массивные электропроводящие материалы, что дает возможность минимизировать потери. Кроме того, в центральной части между магнитами существует область пространства, в которой магнитное поле настолько мало, что позволяет использовать ферритовые сердечники для повышения чувствительности приемной антенны.

Использованная конфигурация магнитной системы позволяет создать магнитное поле, радиальная зависимость которого характеризуется функцией, обладающей ярко выраженным максимумом (Рис. 3). Замечательно, что в области максимума градиент магнитного поля минимален, причем положение этого максимума регулируется расстоянием между полюсами магнитов. Замеры фактической конфигурации магнитного поля для прибора «ЯМК-1» в макете из двух встречных постоянных магнитов подтвердили расчетные

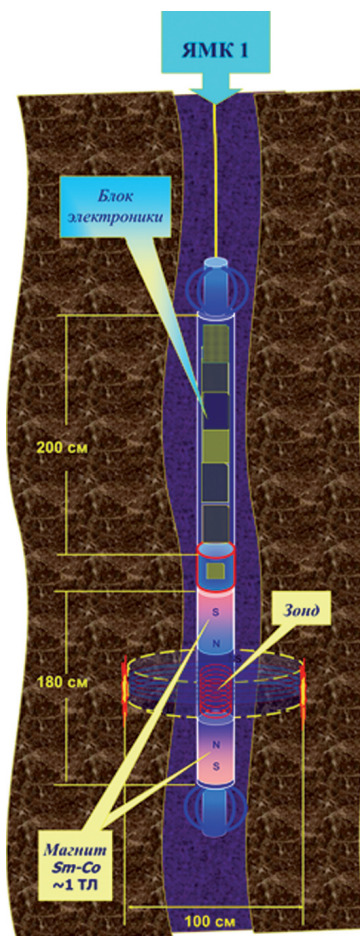


Рис. 1. Блок схема конструкции прибора «ЯМК-1».

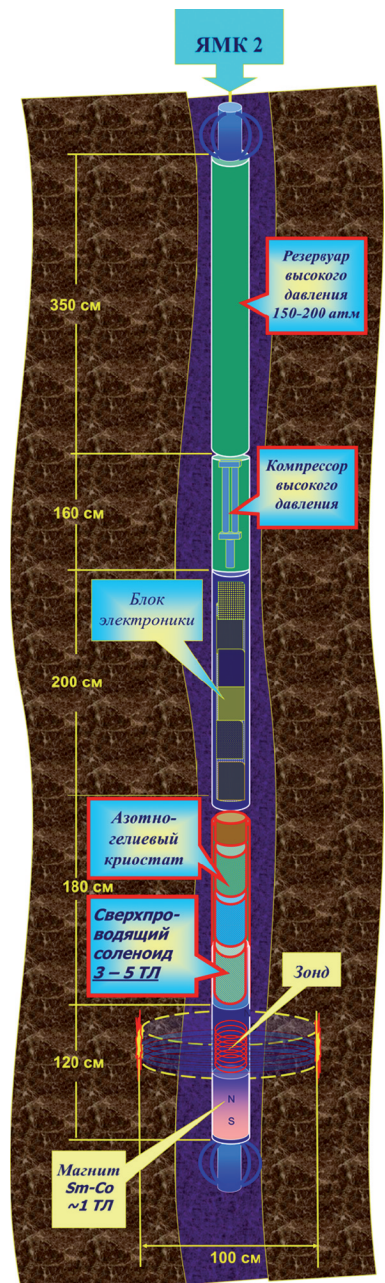


Рис. 2. Блок схема прибора «ЯМК-2».

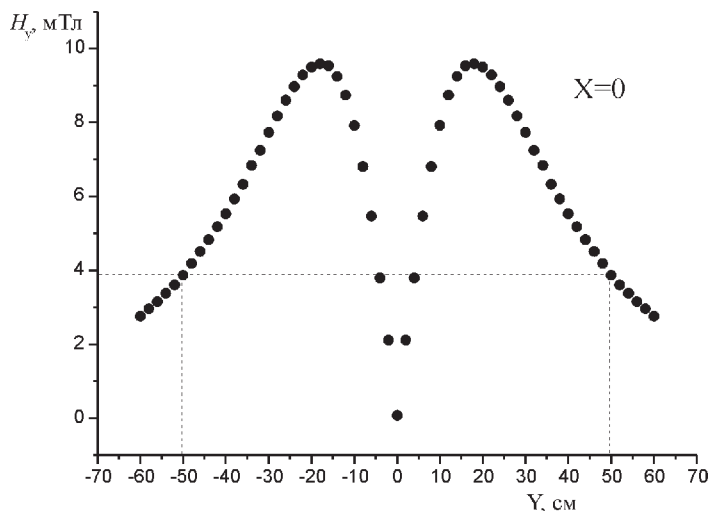


Рис. 3. Радиальная зависимость индукции магнитного поля, созданного двумя противоположными магнитами при длине каждого из них 50 см и диаметре 12 см. Расстояние между полюсами магнитов 50 см. Измерения величины магнитного поля проводились измерителем магнитной индукции РШ1-10. Остаточная намагниченность магнитов составляла 0,98 Тл.

данные. Таким образом, можно утверждать, что выбранная конфигурация магнитов в принципе позволяет создать магнитное поле для уверенного исследования среды даже на расстоянии в 50 см от центра прибора (оси скважины). При этом, за счет невысокого значения градиента магнитного поля исследуемая область будет представлять собой цилиндр толщиной в несколько миллиметров, в то время как существующие сегодня приборы ЯМК в сильном поле позволяют исследовать среду толщиной не более миллиметра.

Предполагается, что прибор «ЯМК-1» будет иметь в своем составе криоаккумулятор оригинальной конструкции весом порядка 20-30 кг, который будет использоваться для охлаждения преусилителя. Расчеты, основанные на результатах испытаний макета, показали, что после охлаждения рабочего тела с указанным весом температура внутри криоаккумулятора в скважинных условиях изменится не более, чем на 30 °К за планируемый период проведения каротажа – 4-5 часов.

Перспективный прибор «ЯМК-2» характеризуется магнитной системой, в которой один из магнитов выполнен на базе сверхпроводящего соленоида. Естественно, что самой главной проблемой на пути использования сверхпроводящего магнита в приборах ЯМК является экстремальность скважинных условий. В связи с этим для сверхпроводящего соленоида разработан специализированный криостат, который должен будет обеспечить работоспособность сверхпроводящего соленоида в скважинных ус-

Характеристика	ЯМК-1	ЯМК-2
Внешний диаметр, мм	155	155
Длина, м	6.5	15.5
Вес, кг	250, не более	500, не более
Глубинность исследования, см	45-55	40-60
Частота резонанса, кГц	150-200	400-500 (расчетное)

Таблица. Основные характеристики разрабатываемых приборов.

ловиях в течение 4-6 часов. Криостат помещается в герметизированную титановую капсулу длиной 2,8 метра, в которой будут размещены также системы заправки криостата жидкими хладагентами. Нормальное давление внутри капсулы обеспечивается специально разработанной системой откачки испаряющихся хладагентов, состоящей из последовательно включенных предварительного насоса и компрессора высокого (до 250 атм) давления. Таким образом, испаряющиеся криожидкости будут перекачиваться в резервуар высокого давления объемом не менее 30 литров.

В системе регистрации сигнала ЯМР в обоих приборах будет применен многоядерный процессор для Фурье-преобразования в реальном времени и цифровой фильтрации первичных данных.

Основные характеристики разрабатываемых приборов приведены в таблице.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2010-218-01-192).

Литература

- Абрагам А. Ядерный магнетизм. М, Изд. ин. лит. 1963. 551.
 Джордж Р., Коатес, Ли ЧиХиао, Манфред Д. Каротаж ЯМР: принципы и применение. Праммер-Хьюстон: Halliburton Energy Services. 1999. 335.
 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.
 Губелин Г., Кеньон Б., Клайнберг Р., Моррис К., Стрейли К. Ядерно-магнитный каротаж – технология 21-го века. *Нефтегазовое обозрение*. 2001. 6. No.1. 30.
 Комбинируемый прибор ЯМК CMR, сканер MRX [Электронный ресурс]: материалы сайта. Хьюстон, Париж, компания "Schlumberger". <http://www.slb.com>. 2010.
 Прибор многочастотного ЯМК MRIL [Электронный ресурс]: материалы сайта. Хьюстон, Дубай, компания Halliburton. <http://www.halliburton.com>. 2010
 ЗондMRex (MR-eXplorer) [Электронный ресурс]: материалы сайта. Хьюстон, компания Baker Hughes. <http://www.bakerhughes.com>. 2010
 Аппаратурный комплекс ядерно-магнитного каротажа ЯК-8, МАЯК (ЯК-9) [Электронный ресурс]: материалы сайта. Бугульма, ООО «ТНГ-Групп». <http://www.tng.ru>. 2010.

D. K. Nurgaliyev, V.E. Kosarev, V.M. Murzakaev, M.S. Tagirov, V.D. Skirda. **Issue of creation perspectives of the nuclear magnetic resonance with increased value of transmission distance borehole instrumentation.**

This work briefly considers opportunities and creation perspectives of the nuclear magnetic resonance with increased value of transmission distance borehole instrumentation. For the identified purpose realization, it is suggested to use cryogenic technologies achievements. Options of the device construction possible realization are represented.

Key words: nuclear magnetic logging, magnet, superconductor, cryoaccumulator.

Владислав Маркович Мурзакаев
 Начальник отдела ЯМР ООО «ТНГ-Групп».

423236, Бугульма, ул. Ворошилова, 21.
 Тел.: (85594) 7-10-83.