

Использование криогенных технологий при проведении ядерно-магнитного каротажа¹



Е.М. Алакшин,
А.В. Клочков, к.ф.-м.н.,
В.В. Кузьмин, к.ф.-м.н.,
Д.К. Нурғалиев, д.г.-м.н.,
Т.Р. Сафин,
М.С. Тагиров, д.ф.-м.н.
 (Казанский (Приволжский)
 федеральный университет)

Адрес для связи: imfador@gmail.com

Ключевые слова: ядерно-магнитный каротаж (ЯМК), криогенные технологии, криоаккумулятор.

В связи с тем, что запасы углеводородного сырья становятся все более ограниченными, возникает необходимость разработки месторождений высоковязких нефтей и битумов. Данные природные углеводороды существенно отличаются от традиционных легких нефтей по молекулярному составу и геологическим характеристикам. Это требует разработки не только новых методов добычи нефти, но и соответствующего измерительного оборудования, применяемого на этапах разведки и исследования (каротажа) скважин.

Одним из классических методов исследования является ядерно-магнитный каротаж (ЯМК) [1]. Несмотря на то, что работы в данной области ведутся достаточно давно, основные характеристики разрабатываемых приборов ЯМК ориентированы на исследование месторождений легкой нефти [2]. Главным недостатком ЯМК является его низкая чувствительность, что не позволяет реализовывать новые методики для исследования месторождений тяжелых нефтей и природных битумов.

Одним из возможных решений задачи разработки новых приборов ЯМК может быть применение криогенных технологий в новых поколениях приборов. В частности, использование сверхпроводящих магнитов могло бы повысить напряженность создаваемого магнитного поля в 3-5 раз по сравнению с существующими приборами, а следовательно, пропорционально увеличить их глубинность и чувствительность.

В данной статье предлагается использовать магнитную систему, изготовленную из высокотемпературного сверхпроводника и находящуюся в тепловом контакте с криоаккумулятором.

Предлагаемое техническое решение

В настоящее время существует множество технических решений по проведению ЯМК и устройству магнитных систем, направленных на улучшение характеристик имеющихся приборов. В частности, предлагается повысить глубинность исследований до 1 м от прибора за счет использования специфической магнитной сборки. В ней применяются постоянные магниты и по меньшей мере один полюсный нако-

Application of cryogenic technologies for NMR logging tool

E.M. Alakshin, A.V. Klochkov, V.V. Kuzmin, D.K. Nourgaliev, T.R. Safin, M.S. Tagirov (Kazan (Volga Region) Federal University, RF, Kazan)

E-mail: imfador@gmail.com

Key words: nuclear magnetic resonance NMR logging tool, cryogenic technologies, cryocapacitor.

The development of heavy oil and bitumen deposits is becoming an actual problem in last years. In this paper the authors propose to use cryogenic technologies for improving the sensitivity of nuclear magnetic resonance logging tool. Particularly, it is proposed to use a magnetic system made of a high temperature superconductor. The low temperature of the magnetic system is provided by the thermal contact with cryocapacitor, which is made of a material with a high specific heat at low temperatures. Experimental data are presented.

нечник. Таким образом имитируется магнитный монополюс в чувствительном объеме внутри формации [3]. Данное решение, кроме оценки пористости породы, насыщенности углеводородами и магнитной проницаемости, позволяет вычислить глинисто-связанную и капиллярно-связанную воду, а также свободный объем жидкости, которые имеют важное значение для оценки свойств пласта.

В другом техническом решении предполагается, что устройство прибора ЯМК для исследования скважин малого диаметра содержит источник постоянного тока, усилитель, коммутатор и основную катушку индуктивности. Последняя соединяется через коммутатор с источником постоянного тока, в который введены не менее двух дополнительных катушек индуктивности, включенных попарно и последовательно относительно основной катушки индуктивности. Они расположены симметрично относительно ее средней точки, их входы соединены с основной катушкой индуктивности через коммутатор, а выходы подсоединены к усилителю [4]. Подобная схема позволяет повысить надежность и точность измерения сигнала и снизить уровень помех.

Использование криогенных технологий в геофизических методах исследования скважин обусловлено необходимостью поддержания криогенных температур в магнитной системе. Для этого обычно предлагается использовать либо сжиженный газ, например жидкий азот, либо твердое тело с большим значением скрытой теплоты плавления, например пропан или фреон (в твердом агрегатном состоянии). Твердое тело охлаждается жидким азотом непосредственно перед помещением в скважину. Однако при использовании таких хладагентов возникает ряд проблем, одной из которых является отвод испаряющихся хладагентов из прибора. Кроме того, существует риск, что каротажный прибор может застрять в скважине на несколько часов. При этом даже твердое тело с большой скрытой теплотой плавления полностью перейдет в газовую фазу. Вследствие высокого давления в глубоких скважинах существующие методы отвода паров неэффективны. Таким образом, не исключен

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 02.G25.31.0029).

риск, что криостат разрушится в результате взрыва. Следовательно, использование обычных криогенных технологий при проведении каротажа затруднительно или невозможно, либо они не могут обеспечить поддержание достаточно низкой температуры длительное время, необходимое для исследования скважины.

В патенте [5] предлагался принципиально новый подход к решению данной задачи: использование криоаккумулятора, который компенсирует теплоприток за счет большой собственной теплоемкости. В качестве материала для него было предложено использовать алюминий, в качестве криогенной жидкости для его предварительного охлаждения – жидкий азот, температура которого составляла 77 К. Однако использование данного технического решения в приборе ЯМК затруднено в связи с небольшой удельной теплоемкостью алюминия при низких температурах, необходимых для работы магнитной системы из высокотемпературного сверхпроводника. В патенте [6] предлагается использовать другие материалы, которые обладают более высокой теплоемкостью, чем алюминий. В частности, редкоземельные соединения, такие как Gd_2O_3 , Gd_2Se_3 , Gd_2O_2S , $GdAlO_3$, обеспечивающие поддержание криогенных температур в интервале 2–15 К в течение нескольких часов.

Основная идея данной работы заключается в реализации скважинного прибора ЯМК в поле сверхпроводящего магнита. Магнитная система состоит из одного или двух соленоидов с катушкой из высокотемпературного сверхпроводника, помещенного в криостат, работающий по принципу криоаккумулятора. Магнитная система перед спуском в скважину охлаждается до температуры жидкого гелия (4,2 К), магнитное поле замораживается с помощью сверхпроводящего ключа, изготовленного из высокотемпературного сверхпроводника. Жидкий гелий извлекается из системы, криостат вакуумируется и спускается в скважину. Наиболее важным отличием данного технического решения от наиболее близких аналогов является отсутствие криогенных жидкостей в процессе каротажа, что исключает проблемы с утилизацией испаряющегося хладагента. Температура криогенной магнитной системы составляет 4-20 К в течение времени, необходимого для цикла измерений (5 ч). Магнитное поле, создаваемое данной магнитной системой, в 3-5 раз сильнее магнитного поля современных аналогов.

Высокой теплоемкостью в области низких температур обладают вещества с низкой температурой Дебая. Ее значения для различных материалов приведены в таблице, из которой видно, что минимальную температуру Дебая имеет свинец. Это свидетельствует о том, что у свинца будет наибольшая

теплоемкость при низких температурах, что подтверждается справочными данными [7]. Соответственно криоаккумулятор, изготовленный из свинца, будет иметь наибольшее время отогрева.

Экспериментальная установка

Для экспериментального подтверждения возможности создания криоаккумулятора, способного поддерживать температуру в заданном диапазоне в течение времени достаточного для проведения ЯМК, была создана установка, схема которой приведена на рис. 1.

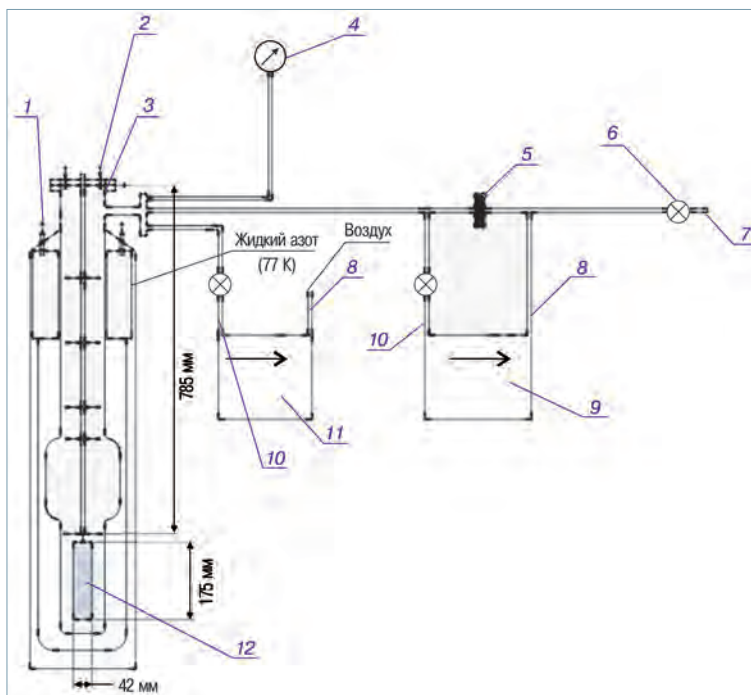


Рис. 1. Схема установки для тестирования криоаккумулятора:
1, 2 – порт для заливки соответственно жидкого азота и жидкого гелия; 3 – криостат; 4 – манометр; 5 – зажим; 6 – вентиль; 7 – линия возврата гелия; 8 – выход; 9 – насос НВР-5Д; 10 – вход; 11 – насос НВР-5Д (откачка гелия); 12 – криоаккумулятор

Установка содержит криостат 3 с азотным и гелиевым баками объемами соответственно 9 и 8 л. Для создания вакуума используется форвакуумный насос НВР-5Д 9 подачей 5 л/с и с остаточным давлением 10^{-2} мм.рт.ст. Скорость откачки на входе 10 насоса регулируется с помощью вакуумного вентиля 6. Для контроля давления в системе имеется манометр 4 с точностью измерения 0,002 МПа. Для удаления гелия из криостата после охлаждения криоаккумулятора 12 до низких температур используется насос НВР-5Д 11.

Для исследования температурно-временной зависимости был изготовлен свинцовый криоаккумулятор массой 2,8 кг, диаметром 42 мм, высотой 175 мм с высверленными отверстиями, в которые помещались калиброванные термосопротивления фирмы Allen-Bradley (США) номиналом 10, 100 и 150 Ом при комнатной температуре [8]. С целью достижения хорошего контакта термодатчика с криоаккумулятором использовалась вакуумная смазка. На рис. 2 представлена модель свинцового криоаккумулятора.

На первом этапе экспериментов криостат с находящимся внутри него свинцовым криоаккумулятором охлаждался жидким азотом до температуры 77 К методом медленной заливки жидкого азота на дно криостата через одно из отверстий в крышке прибора. Расход жидкого азота составлял 2 л. После

Вещество	Температура Дебая, К
Алмаз	1860
Кремний	647
Железо	420
Алюминий	390
Медь	315
Германий	290
Серебро	215
Свинец	88

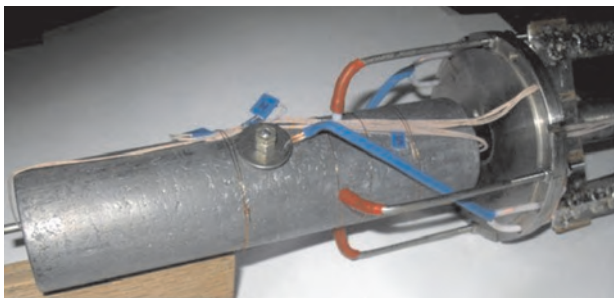


Рис. 2. Свинцовый криоаккумулятор с подведенными тоководами

охлаждения криоаккумулятора из криостата форвакуумным насосом был откачан газообразный азот, давление в приборе было доведено примерно до 1 Па. Температура свинцового криоаккумулятора контролировалась ранее откалиброванными угольными сопротивлениями фирмы Allen-Bradley. При этом два датчика располагались в верхней части криоаккумулятора, один – в нижней.

Жидкий гелий заливался во внутренний гелиевый сосуд Дьюара с целью охлаждения свинца до температур жидкого ^4He . Для полного охлаждения потребовалось около 2 л жидкого гелия. Оставшийся на дне криостата после охлаждения жидкий гелий откачивался насосом НВР-5Д. При этом температура внутри криостата понижалась примерно до 2,5 К за счет удаления дополнительного тепла из прибора в процессе откачки. Процесс выпаривания гелия контролировался с помощью угольного термосопротивления, находящегося вблизи дна экспериментального сосуда Дьюара. После испарения жидкого гелия сосуд Дьюара с находящимся внутри него свинцовым криоаккумулятором подвергался вакуумированию до давления 1 Па для исключения прямых теплопритоков к свинцу через газообразный гелий. Это позволяло минимизировать теплопритоки через теплообменный прямой контакт свинцового криоаккумулятора со стенками и конструктивными частями внутренней вставки в криостат.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные времени отогрева цилиндра, полученные при охлаждении и без охлаждения жидким азотом радиационных экранов. Начальное время измерения для всех экспериментальных зависимостей было выбрано исходя из следующего положения: свинец при температурах ниже 7 К является сверхпроводником I рода и обладает небольшой теплопроводностью, что не позволяет достоверно измерять его температуру в данном температурном диапазоне. Отогрев от гелиевой температуры (4,2 К при давлении 10^5 Па) до 7 К во всех проведенных исследованиях не превышал 10 мин.

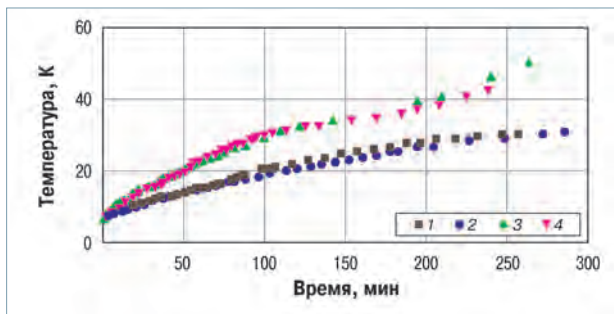


Рис. 3. Зависимость температуры свинцового цилиндра от времени, прошедшего с начала эксперимента, когда температура цилиндра составляла 7 К, при охлаждении радиационных экранов без тоководов (1) и с тоководами (2); без охлаждения радиационных экранов без тоководов (3) и с тоководами (4)

Как видно из рис. 3, время отогрева от 7 до 20 К составляет примерно 102 мин, от 7 до 30 К – 217 мин (при дополнительном охлаждении радиационных экранов жидким азотом до температуры 77 К). При отсутствии охлаждения радиационных экранов жидким азотом время отогрева от 7 до 20 К составляет примерно 54 мин, от 7 до 30 К – 100 мин. Если масштабировать это время на свинцовый цилиндр высотой 10 см с диаметром поперечного сечения 10 см, который может использоваться в реальной существующей установке, то при грубой оценке получится, что отогрев будет происходить в течение 14 ч. Это удовлетворяет основному требованию к работе криоаккумулятора: поддержание достаточно низкой температуры длительное время, необходимое для проведения каротажа скважины. Дополнительного теплопритока через тоководы не наблюдается. Следовательно, основные теплопритоки к образцу обусловлены не прямым тепловым контактом свинцового криоаккумулятора с внутренней вставкой криостата, а, возможно, создаются благодаря остаточной газовой фазе ^4He . Кроме того, при охлаждении экрана жидким азотом скорость отогрева значительно меньше, чем при наличии неохлаждаемого экрана.

Список литературы

1. 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.
2. Коатес Д.Р., Хяо Л.Ч., Праммер М.Д. Каротаж ЯМР: принципы и применение. – Хьюстон: Halliburton Energy Services, 1999. – 365 с.
3. Pat. US 7733086. Systems and methods for deep-looking NMR logging/ M.G. Prammer, S. Knizhnik, S.K. Menger, G.D. Goodman, E.J. Harris, E. Drack; assignee: Halliburton Energy Services, Inc. (Houston, TX). – No. 12/261343; filed 30.10.08; issued 08.06.10.
4. Пат. РФ № 2008113422/28. Устройство ядерно-магнитного каротажа для исследования скважин малого диаметра/ В.М. Мурзакаев, В.К. Тараканов, А.Н. Сотников, В.С. Дубровский.
5. Pat. US 4312192. Borehole logging tool cryostat/ A. Zarudiansky, S. Janssen, J. Touret; assignee: Schlumberger Technology Corp. (Houston, TX). – No. 06/161068; filed 19.06.80; issued 26.02.82.
6. Pat. US 4340405. Apparatus and method for maintaining low temperatures about an object at a remote location/ W.A. Steyerl, W.C. Overton; assignee: The United States of America as represented by the United States (Washington, DC) – No. 06/202041; filed 29.10.80; issued 20.07.82.
7. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения / М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадков. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 210 с.
8. Вентура Г., Ризегари Л. Искусство криогеники. – М.: Интеллект, 2011. – 194 с.

References

1. Dzhaifarov I.S., Syngaevskiy P.E., Khafizov S.F., *Primenenie metoda yadernogo magnitnogo rezonansa dlya kharakteristiki sostava i raspredeleniya plastrovyykh flyuidov* (The application of nuclear magnetic resonance to characterize the composition and distribution of reservoir fluids), Moscow: Khimiya Publ., 2002, 439 p.
2. Coates G.R., Xiao L., Prammer M.G., *NMR Logging. Principles and Applications*, Gulf Professional Publishing, 2001, 365 p.
3. Patent no. 7733086 USA, *Systems and methods for deep-looking NMR logging*, Inventor: Manfred G. Prammer, 2009.
4. Patent no. 2378670 PF, *Nuclear magnetic logging for surveying slim hole well*, Inventors: Murzakayev V.M., Tarakanov V.K., Sotnikov A.N., Dubrovskiy V.S..
5. Patent no. 4312192 USA, *Borehole logging tool cryostat*, Inventors: Zarudiansky Alain et al.
6. Patent no. 4340405 USA, *Apparatus and method for maintaining low temperatures about an object at a remote location*, Inventors: Steyerl William A. Jr.
7. Malkov M.P., Danilov I.B., Zeldovich A.G., Fradkov A.B., *Spravochnik po fiziko-tekhnicheskim osnovam glubokogo okhlazhdeniya* (Handbook of physical and technical fundamentals of deep cooling), Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1963, 210 p.
8. Ventura G., Risegari L., *The art of cryogenics: low-temperature experimental techniques*, Elsevier Ltd., 2008, 378 p.