

УДК: 538.955, 537.635, 547.912

*Д.К. Нургалиев<sup>1</sup>, В.Е. Косарев<sup>1</sup>, В.М. Мурзакаев<sup>2</sup>, М.С. Тагиров<sup>1</sup>  
В.Д. Скирда<sup>1</sup>, В.А. Тюрин<sup>1</sup>, Б.И. Гизатуллин<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, victor.kosarev@ksu.ru  
<sup>2</sup>ООО «ТНГ-Грунт», Бузурьма, Murza@tngf.tatneft.ru*

## АППАРАТУРА ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛНОРАЗМЕРНЫХ КЕРНОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ И ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

В работе обсуждаются основные особенности характеристики аппаратуры ядерного магнитного резонанса, разрабатываемой для исследования полноразмерных кернов. Прибор, предназначенный для лабораторных исследований, снабжен сверхпроводящим магнитом с индукцией 1,5 Тл. Магнитная система мобильного аналога прибора представляет собой цилиндр Хальбаха с индукцией магнитного поля -  $B_0 = 0,19$  Тл. Приборы снабжены блоками импульсного градиента магнитного поля, обеспечивающими получение одномерного пространственного разрешения получаемой информации вдоль оси керна.

*Ключевые слова:* ядерный магнитный резонанс, магнит, сверхпроводник, керн, релаксация, самодиффузия.

### Введение

Разработка приборов для получения информации о кернах в лабораторных условиях призвана, прежде всего, обеспечить корректность трактовки информации, получаемой методами ЯМР каротажа (Lizhi, 1998; Джафаров, 2002). Кроме того, при помощи лабораторных исследований кернов можно получить такую информацию о характере и состоянии флюида в пористом пространстве породы керна, которая недоступна в принципе для скважинных приборов. Прежде всего, речь идет о принципиальной возможности в лабораторных условиях организовать полномасштабные исследования кернов путем получения данных при контролируемом варьировании множества внешних факторов. К таковым можно отнести температуру, давление, флюидонасыщенность, характер флюида и т.д.

Наряду с этим получение методом ЯМР менее объемной и, даже, менее качественной, информации о характеристиках керна, но непосредственно сразу после его извлечения из скважины (Caizhi, 2002), может оказаться чрезвычайно полезным для оперативного принятия решения во время буровых работ. В целом, оперативный ЯМР-анализ образцов кернов в их естественном насыщении, как в лабораторных, так и в полевых условиях, непосредствен-

но после отбора проб, обеспечивает возможность своевременного получения и использования важной геологической информации.

Как известно, чувствительность ЯМР аппаратуры сильно зависит от частоты резонанса, следовательно от величины поляризирующего магнитного поля  $B_0$ . Другими словами, чем больше напряженность магнитного поля, тем более качественно может быть проведен ЯМР анализ. В принципе нет никаких оснований требовать, чтобы установка лабораторного исполнения каким-либо существенным образом отличалась по функциональным возможностям от их мобильных аналогов. Единственное условие, накладываемое на мобильный аналог установки, сводится к ее массово-габаритным характеристикам, которые, в свою очередь, определяются, в основном, характеристиками магнитных систем.

Если в лабораторных условиях измерения могут быть проведены наиболее качественно с использованием мощной и габаритной техники ЯМР, то в полевых условиях требуется найти компромисс между качеством исследований и мобильностью используемой аппаратуры.

Дополнительное важное требование к качеству магнитной системы состоит в необходимости обеспечения однородности магнитного поля во всем объеме образ-

Окончание статьи Ю.А. Волкова, В.Н. Михайлова «Актуальные задачи совершенствования научных основ проектирования разработки нефтяных месторождений»

### Yu.A. Volkov, V.N. Mikhailov. Critical tasks of the improvement of oil fields development design scientific basis.

Oil industry turned out to be without fundamental basis for solution of oil fields development design issues. Nowadays this design is carried out worse than 30-40 years ago. There is a paradoxical situation: technique and technology of oil production have been consistently evolved, and the oil recovery factor has been reduced. The paper describes the issues of oil fields development design, as well as industry problems are outlined and solution approach is represented.

*Keywords:* oil fields development design, an iterative technique of geological hydrodynamic models, planning of geological and technological works.

*Юрий Андреевич Волков*  
Директор ООО «ЦСМРнефть» при Академии наук Республики Татарстан

420061, Россия, г. Казань, Н.Ершова, 55-20.  
Тел.: (987) 290-26-47

*Вячеслав Николаевич Михайлов*  
К.физ.-мат.н., директор ООО «КНТЦ «Недра»

420097, Россия, г. Казань, а/я 133. Тел.: (843) 273-67-02

Диаметр исследуемых образцов	не менее 116 мм
Максимальная длина исследуемого образца	1,5 м
Частота резонанса на протонах:	
Лабораторный вариант	64 МГц
Мобильный вариант	8,2 МГц
Вес мобильного варианта	не более 300 кг
Мощность импульса тока в градиентной катушке	до 100 кВт
Градиент магнитного поля в импульсе	не менее 150 Гс/см

Таблица. Основные характеристики установок «ЯМР-Керн».

ца. Это требование особенно значимо для полноразмерных кернов, диаметр которых достигает 10 см, а длина – до 1,5 м.

На рынке существует достаточно широкий спектр предложений и возможностей исследований методом ЯМР кернов с малыми размерами образцов. При этом аппаратура для измерений ЯМР характеристик полноразмерных кернов практически отсутствует или в качестве таковой используются медицинские приборы магнитно-резонансной томографии (МРТ). Другой важный момент состоит в том, что практически все коммерческие приборы, предназначенные для исследования кернов, ориентированы на получение в основном стандартной информации, основанной на анализе амплитуды сигнала и данных по спектрам времен релаксации. При этом, как правило, измерения коэффициентов самодиффузии молекул флюида в керне по прогрессивным методикам с импульсным градиентом магнитного поля не предусмотрены, хотя именно данные по исследованию трансляционной подвижности молекул жидкости в зависимости от временных параметров импульсной последовательности способны нести корректную информацию о размерах пор (Маклаков, 1996; Тюрин, 2007) и проницаемости. Все вышесказанное свидетельствует о том, что разработка специализированной аппаратуры ЯМР для исследования полноразмерных кернов (далее приборы «ЯМР-Керн») в лабораторных условиях и непосредственно на буровой является актуальной задачей.

### Особенности конструкции магнитных систем приборов «ЯМР-Керн»

Для обеспечения высокой чувствительности прибора



Рис. 1. Внешний вид сверхпроводящего магнита замкнутого цикла, предназначенного для лабораторного варианта прибора ЯМР «Керн».

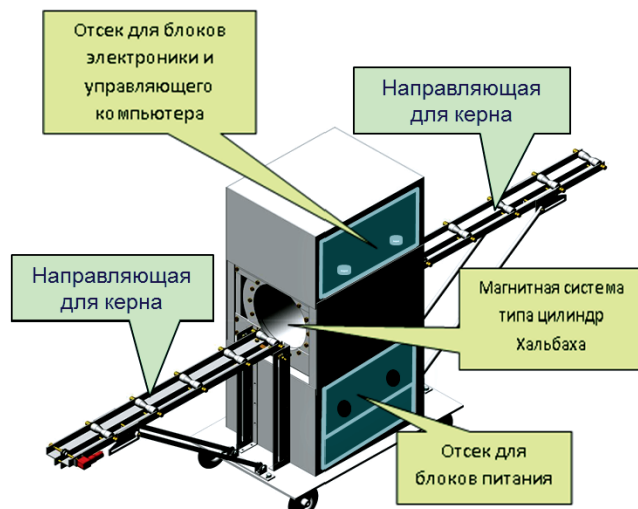


Рис. 2. Общий вид мобильной установки «ЯМР-Керн» в рабочем состоянии.

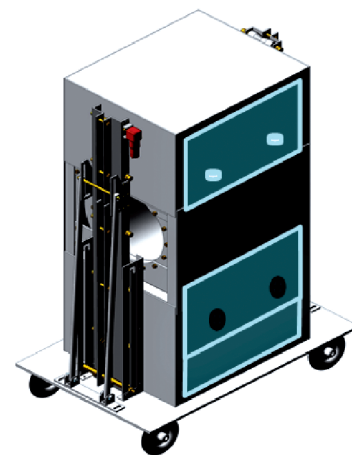


Рис. 3. Общий вид мобильной установки «ЯМР-Керн» в транспортном состоянии.

«ЯМР-Керн» в лабораторном варианте выбор был остановлен на сверхпроводящей магнитной системе замкнутого цикла, разработанной в ООО «РТИ – криогенные системы» (г. Москва). Эта система достаточно компактна, так как разрабатывалась для ортопедического ЯМР томографа. Диаметр теплового отверстия сверхпроводящего магнита составляет 28 см при размерах рабочей области пространства порядка 10 – 15 см. Величина магнитного поля составляет 1,5 Тл, что для резонанса на протонах соответствует 64 МГц. Таким образом, подобная магнитная система наиболее оптимальна для задач исследования полноразмерных кернов с диаметром до 10 см. Внешний вид магнитной системы показан на рисунке 1. В указанной магнитной системе отсутствует контур азотного охлаждения, а гелий поддерживается в жидком переохлажденном состоянии с помощью криокулера (компрессора). Несомненно, эти обстоятельства следует отнести к достоинствам такой системы, однако немалая плата за них заключается в необходимости обеспечения прибора системами бесперебойного электроснабжения и водоснабжения для питания и охлаждения компрессора. В полевых условиях это становится весьма проблематичным.

При выборе типа магнитной системы для мобильного варианта прибора «ЯМР-Керн» необходимо найти компромисс между величиной и однородностью магнитного поля с одной стороны, компактностью и простотой в обслуживании – с другой. На наш взгляд, лучше всего на сегодняшний день этим требованиям удовлетворяют генераторы магнитного поля на структурах Хальбаха, по форме представляющих собой, так называемый цилиндр Хальбаха (Halbach, 1980). В России такие магниты могут быть изготовлены, в частности, в компании ООО «ПМТ и К» (г. Троицк).

Общий вид мобильной установки «ЯМР-Керн» показан на рисунке 2. В едином корпусе прибора размещены все необходимые блоки питания и электронные узлы. Кроме того, прибор снабжен системой позиционирования исследуемого образца в датчике ЯМР, с помощью которой сканирование ЯМР характеристик керна по его длине может осуществляться в автоматическом режиме. В транспортном состоянии (Рис. 3) направляющие для керна (дли-

на каждого из них составляет 130 см) устанавливаются в вертикальное положение. В результате габаритные размеры прибора существенно уменьшаются.

Как лабораторный, так и мобильный варианты исполнения прибора ЯМР «Керн» содержат магнитные системы с диаметрами проходных отверстий 280 - 290 мм, что обеспечивает возможность получения достаточно высокой однородности магнитного поля в исследуемой области полноразмерного керна. Кроме того, это позволяет оптимизировать геометрические размеры градиентной катушки для достижения высокоэффективных (до 200 Гс/см) градиентов магнитного поля с малыми (до 100 мкс) временами нарастания и спада.

Входящий в состав аппаратуры ЯМР «Керн» блок импульсного градиента основан на запатентованных технических решениях и обеспечивает идентичность пар импульсов градиента с ошибкой, не превышающей  $10^{-6}$ . При этом он способен сформировать в градиентной катушке импульсный ток мощностью до 100 кВт.

Для стабилизации резонансных условий в мобильном варианте прибора разработана оригинальная система стабилизации. В электронной части аппаратуры применена современная концепция полного цифрового синтеза частот и цифрового квадратурного детектирования сигнала ЯМР. Основные характеристики лабораторного и мобильного варианта установок указаны в таблице.

Разрабатываемый прибор ЯМР «Керн», предназначенный для исследования полноразмерных кернов, отличается от существующих аналогов, прежде всего, повышенными частотами резонанса, что обеспечивает достижение превосходства по чувствительности. Кроме того, наличие в составе прибора мощного блока импульсного градиента обеспечивает достижение непревзойденных для такого класса приборов характеристик по исследованию процессов самодиффузии молекул, что важно для получения корректной информации о размерах пор и проницаемости пористого пространства в образцах керна. При этом может быть использован многолетний опыт применения и развития метода ЯМР с импульсным градиентом магнитного поля для исследования сложных молекулярных систем, накопленный в Казанском федеральном университете (Маклаков, 1987; Skirda, 2002).

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

## Литература

- 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.
- Lizhi Xiao, Shi Hongbin. Low field NMR core analysis and its applications to well logging interpretation. *Well Logging Technology* (in Chinese). 1998. V.22(1). 42-49.
- Weiming Wang, Li Pei, Ye Chaohui. Multi-exponential inversions of nuclear magnetic resonance relaxation signal. *Science in China*. Ser. A. 2001. V. 44(11). 1477-1484.
- Caizhi Wang, Li Ning. On the method of analyzing and processing T2 relaxation spectra from NMR log data and relative program design on Cif2000 platform. *Well Logging Technology* (in Chinese). 2002. V.26(5). 360-363.
- Маклаков А.И., Хозина Е.В., Двошкин Н.К. Определение геометрических параметров пор и корреляционных функций сил взаимодействия молекул жидкости с их поверхностью методом ЯМР с импульсным градиентом магнитного поля. *Коллоидный журнал*. 1996. т. 58. №4. 509-513.

Тюрин В.А., Маклаков А.И. Экспериментальные и истинные значения коэффициентов самодиффузии жидкости в пористой среде. *Коллоидный журнал*. 2007. т. 69. №6. 839 - 844.

K. Halbach. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material. *Nuclear Instruments and Methods*. 1980. V. 169. № 1. 1-10.

Маклаков А.И., Скирда В.Д., Фаткуллин Н.Ф. Самодиффузия в растворах и расплавах полимеров. Казань, Изд. КГУ. 1987. 224.

Skirda V.D. The features of PFG NMR technique and some methodical aspects of its application. In Book "Magnetic Resonance in Colloid and Interface Science". Edited by Jacques P. Fraissard and Olga Lapina. 2002. 245-254. (Book Series: NATO SCIENCE SERIES: II: Mathematics, Physics and Chemistry, V. 76)

D.K. Nurgaliyev, V.E. Kosarev, V.M. Murzakaev, M.S. Tagirov, V.D. Skirda, V.F. Tyurin, B.I. Gizatullin. **The nuclear magnetic resonance equipment for the research in laboratory and field conditions of full-sized core samples.**

This paper deals with the main particularities of nuclear magnetic resonance equipment characteristics, developed for full-sized core samples examination. Designed for the laboratory researches device is equipped with superconducting magnet with 1.5 tesla induction. Magnetic system of the device's portable analogue is a Halbach cylinder with magnetic field induction  $B_0 = 0.19$  tesla. Devices are supplied with blocks of impulsive magnetic field gradient, which enables one-dimensional spatial resolution reception of acquired information along the core sample axis.

*Key words:* nuclear magnetic resonance, magnet, the superconductor, core, relaxation, self-diffusion.

*Данис Карлович Нурғалиев*

Д.геол.-мин.н, профессор, директор Института геологии и нефтегазовых технологий.

Тел.: (843)233-74-01.

*Виктор Евгеньевич Косарев*

Ассистент кафедры геофизики и геоинформационных технологий Института геологии и нефтегазовых технологий.

Тел.: (843)233-73-75, (904)765-14-29.

*Мурат Салихович Тагиров*

Д.физ.-мат.н., профессор, зав. каф. квантовой электроники и спектроскопии Института физики.

Тел.: (843) 231-53-55.

*Владимир Дмитриевич Скирда*

Д.физ.-мат.н., профессор, зав. каф. физики молекулярных систем Института физики.

Тел.: (843)292-75-99

*Владимир Александрович Тюрин*

К.физ.-мат.н., доцент кафедры радиофизики Института физики.

*Булат Ильдарович Гизатуллин*

Инженер кафедры физики молекулярных систем Института Физики.

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18.