

УДК 550.832.54

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРИСТОСТИ ПЛАСТОВ ПО ДАННЫМ МНОГОЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ НЕЙТРОННОГО КАРОТАЖА МАНК

*Д.И. Киргизов, В.Е. Косарев, М.М. Алимов, Б.В. Платов*

### Аннотация

Описан многоцелевой аппаратно-программный комплекс, включающий новый прибор на основе высокочастотного импульсного нейтронного генератора и пакет программ для обработки показаний прибора. Основными отличиями нового прибора от имеющихся являются: регулируемая частота и длительность импульсов нейтронов, а также двухзондовая конфигурация, причем каждый зонд содержит несколько детекторов надтепловых и тепловых нейтронов. Прибор позволяет измерять характеристики замедления нейтронов с целью определения пористости коллектора. Возможно также измерение пористости и макросечения захвата тепловых нейтронов в поле тепловых нейтронов. Выполнена расчетная оптимизация прибора, проведена серия модельных и скважинных измерений, показавших высокую чувствительность прибора и его помехоустойчивость относительно влияния литологии, а также минерализации скважинной и пластовой жидкости.

**Ключевые слова:** генератор нейтронов, замедление нейтронов, макросечение захвата тепловых нейтронов, пористость.

### Введение

В настоящее время для доразведки месторождений нефти в старом фонде обсаженных скважин в нефтяных регионах России используется комплекс геофизических исследований скважин (ГИС), включающий импульсный нейтронный каротаж (ИНК), нейтронный каротаж (НК) в модификациях нейтронного-гамма каротажа (НГК) или нейтрон-нейтронного каротажа по тепловым нейтронам (ННКт), а также каротаж естественной радиоактивности в обычном (ГК) и спектральном (ГКС) вариантах. В этом комплексе НК используется для определения водородосодержания пластов, а совместно с ГК (или ГКС) – для определения пористости. Метод ИНК применяется для определения характера насыщения продуктивных пластов. Известно [1], что из всех модификаций нейтронного каротажа, предназначенного для определения водородосодержания пластов, наиболее устойчивым к помехам является метод ННК по надтепловым нейтронам (ННКнт).

В 2010–2011 гг. в Научно-техническом управлении ООО «ТНГ-Групп» создана многоцелевая аппаратура нейтронного каротажа (МАНК) с использованием в качестве источника нейтронов импульсного генератора нейтронов. Прибор МАНК реализует одновременно метод импульсного нейтрон-нейтронного каротажа (ИННК) по тепловым и надтепловым (надкадмиевым) нейтронам

(ИННКт и ИННКнт) по двум зондам. Общее количество зондов при этом равно четырем. МАНК позволяет измерять время замедления ( $\tau_z$ ) и время термализации нейтронов ( $\tau_{\text{терм}}$ ) по двум зондам, которые обеспечивают независимые оценки водородосодержания в прискважинной зоне пласта. Кроме того, прибор измеряет коэффициент диффузии тепловых и надтепловых нейтронов, что позволяет точнее определять пористость пласта (уменьшается влияние минерализации пластовой жидкости и литологии). В качестве излучателя нейтронов используется импульсный нейтронный генератор ИНГ-061, который разработан, изготавливается и поставляется ФГУП ВНИИА [2]. В приборе реализован двухимпульсный режим работы генератора. Для обработки показаний прибора в Казанском (Приволжском) федеральном университете разработан пакет программ.

Близкими по функциональным возможностям прибора МАНК являются аппаратура APS (*Accelerator Porosity Sonde*) компании Schlumberger [3], а также аппаратура АИНК-89 производства ФГУП ВНИИА [4].

### Описание скважинного прибора МАНК

Конструктивно скважинный прибор МАНК состоит из двух зондов регистрации тепловых нейтронов и двух зондов регистрации надтепловых (надкадмиевых) нейтронов, одномерных с зондами тепловых нейтронов. В качестве первичных детекторов нейтронов в малом зонде (длина 30 см) используются российские счетчики на основе  $^3\text{He}$  типа СНМ-56 (2 счетчика в зонде тепловых нейтронов и 1 счетчик, окруженный листом кадмия толщиной 0.8 мм в зонде надтепловых нейтронов). Соответственно, в качестве первичных детекторов нейтронов в большом зонде (длина 60 см) используются 1 большеразмерный счетчик СНМ-80 в зонде тепловых нейтронов и 2 счетчика СНМ-67, окруженных листом кадмия толщиной 0.8 мм в зонде надтепловых нейтронов. Необходимо отметить, что кадмиевый экран такой толщины абсолютно непрозрачен для нейтронов с энергией 0.4 эВ и меньше.

Во время разработки аппаратуры было проведено математическое моделирование методом Монте-Карло при помощи программы MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code). Целью моделирования был выбор оптимальной конструкции скважинного прибора и определение оптимального режима работы измерительного тракта аппаратуры. Получены расчетные (теоретические) кривые спада надтепловых и тепловых нейтронов для пластов с различной литологией и минерализацией пластовой и скважинной жидкостей. Проведена оценка влияния на показания прибора обсадной колонны, глинистой корки, температуры скважины и др. Оценены ожидаемые погрешности измерений параметров среды разрабатываемой аппаратурой. Полученные расчетные данные были проверены при помощи опытного экземпляра скважинного прибора МАНК на нескольких моделях пластов, расположенных на территории Метрологического центра ООО «ТНГ-Групп». Зарегистрированные показания прибора хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

На рис. 1 представлен полный временной режим регистрации информации системой МАНК. Как видно, присутствуют два типа временных интервалов (спектров): короткий и длинный (интервал I и II). Временная схема измерений



Рис. 1. Алгоритм работы блока управления генератором

однотипна для всех детекторов тепловых и надтепловых нейтронов. Измерения короткого временного спектра включают облучение окружающей среды импульсом быстрых нейтронов (14 МэВ) в течение 24 мкс и временную паузу 96 мкс, разбитую на временные окна с шагом квантования 6 мкс. Всего имеется  $N$  коротких временных спектров, в течение которых производится накопление данных. Затем производятся измерения в длинном временном интервале, который включает облучение импульсом быстрых нейтронов (14 МэВ) длительностью 72 мкс и регистрацию нейтронов в интервале от 0 до 1200 мкс с шагом временного квантования 12 мкс. Для выравнивания случайных составляющих погрешностей оценок интерпретационных параметров соотношение циклов измерений коротких и длинных временных интервалов выбрано экспериментально.

Скважинный прибор объединяет в себе возможности различных типов скважинной аппаратуры, используемой в настоящее время. Это позволяет уменьшить суммарную стоимость необходимого оборудования. Одновременная запись и дальнейшая комплексная интерпретация получаемых данных увеличивают их информативность, а также достоверность результатов интерпретации.

Важным преимуществом применения управляемых генераторов нейтронов является экологическая безопасность их использования по сравнению со стационарными источниками нейтронов, отсутствие защитных контейнеров для перевозки излучателей. Кроме этого, благодаря большей интенсивности излучения управляемого генератора нейтронов по сравнению со стационарными источниками нейтронов появляется возможность увеличения скорости проведения каротажа.

### Результаты испытания прибора МАНК

Опытный экземпляр прибора МАНК прошел приемочные испытания в Метрологическом центре (МЦ) Научно-технического управления (НТУ) ООО «ТНГ-Групп». Аппаратурой МАНК были проведены замеры в Государственных стандартных образцах пористости и плотности горных пород (комплект СО-НК, внесенный в Государственный реестр с регистрационным номером ГСО 8632-2004). На рис. 2 представлен список образцов пористости, которые использовались для проведения испытаний.

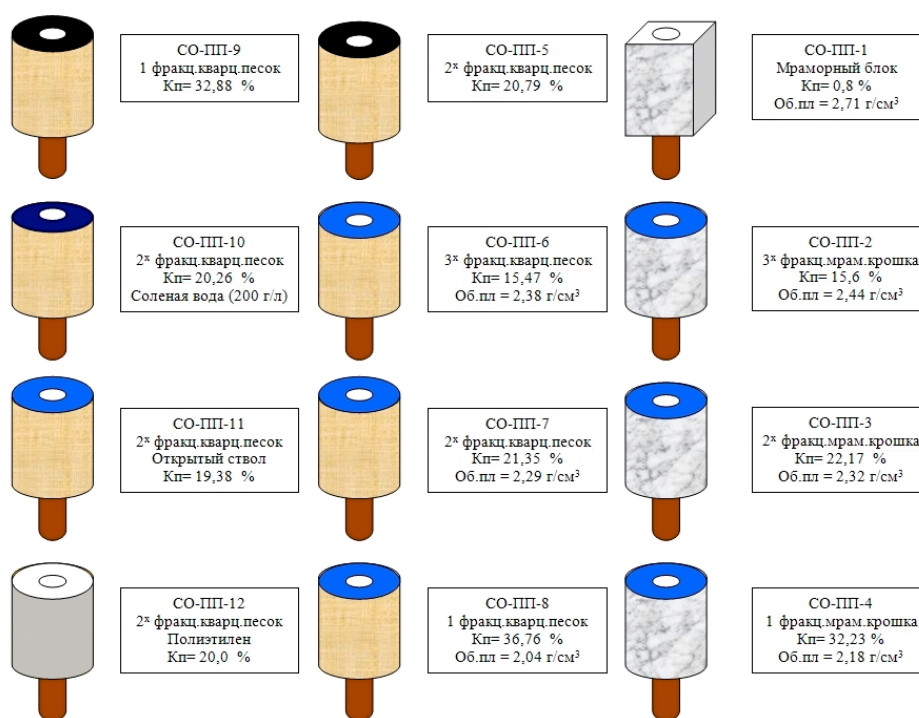


Рис. 2. Государственные стандартные образцы пористости и плотности горных пород в МЦ НТУ ООО «ТНГ-Групп», использованные для проведения испытаний МАНК

На рис. 3 и 4 приведены временные спады тепловых и надтепловых нейтронов, полученные прибором МАНК на карбонатных моделях. На основе этих кривых вычисляется целый ряд различных нейтронных параметров. Как видно из рисунков, наблюдается значительная зависимость характера спада количества нейтронов от пористости моделей. На рис. 3 четко прослеживается двухэкспоненциальный характер спадов для всех кривых. Из теории нейтронного каротажа [5] известно, что при регистрации кривых импульсного нейтронного каротажа существенный вклад вносит также скважинная жидкость. Поэтому при обработке кривых спада использовалось двухэкспоненциальное приближение, позволяющее отдельно определять макроскопическое сечение поглощения ( $\Sigma_a$ ) в скважине и пласте.

На рис. 5 представлен пример такого приближения для модели СО-ПП-1 (известняк с пористостью 0.8%). Как видно, приближенная кривая довольно точно описывает кривую исходных данных.

При помощи алгоритма двухэкспоненциального приближения получены значения среднего времени жизни тепловых нейтронов  $\tau_{\text{пласта}}$  для всех моделей (см. табл. 1).

В результате для модельной пористой среды, состоящей из мраморной крошки (табл. 1), были получены зависимости среднего времени жизни тепловых нейтронов от пористости для дальнего (см. рис. 6) и ближнего зондов. В дальнейшем эти зависимости планируется использовать при решении обратной задачи, а именно для определения пористости пластов, пересеченных скважиной.

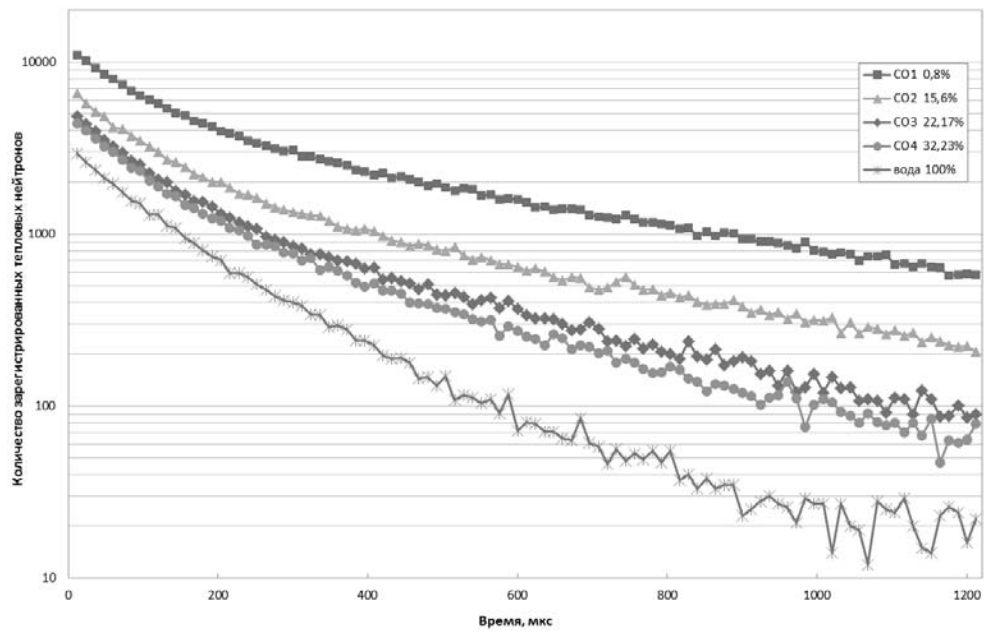


Рис. 3. Временные спады тепловых нейтронов на дальнем зонде в моделях пластов различной пористости

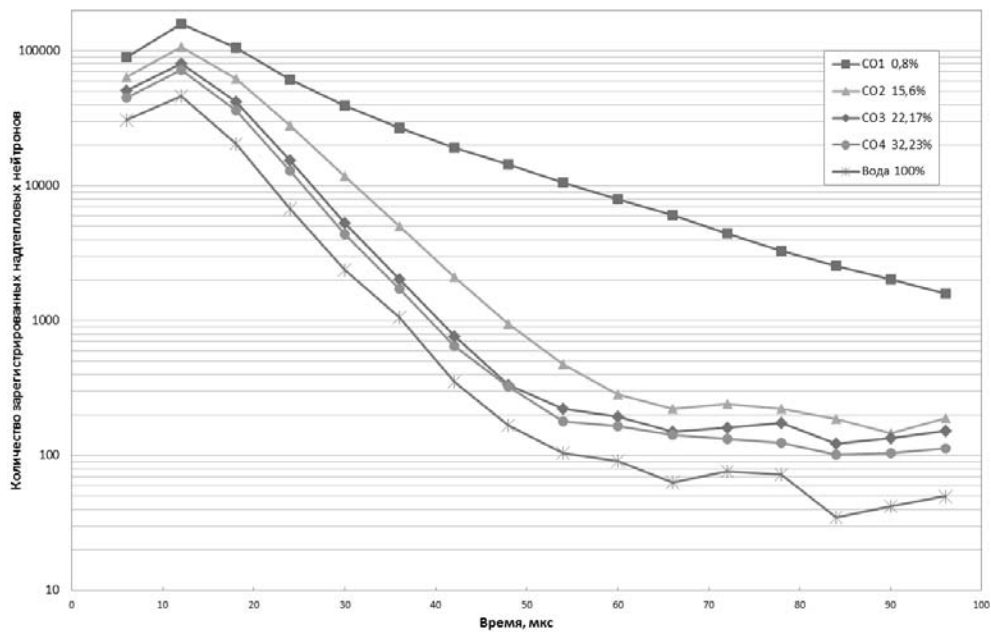


Рис. 4. Временные спады надтепловых нейтронов на дальнем зонде в моделях пластов различной пористости

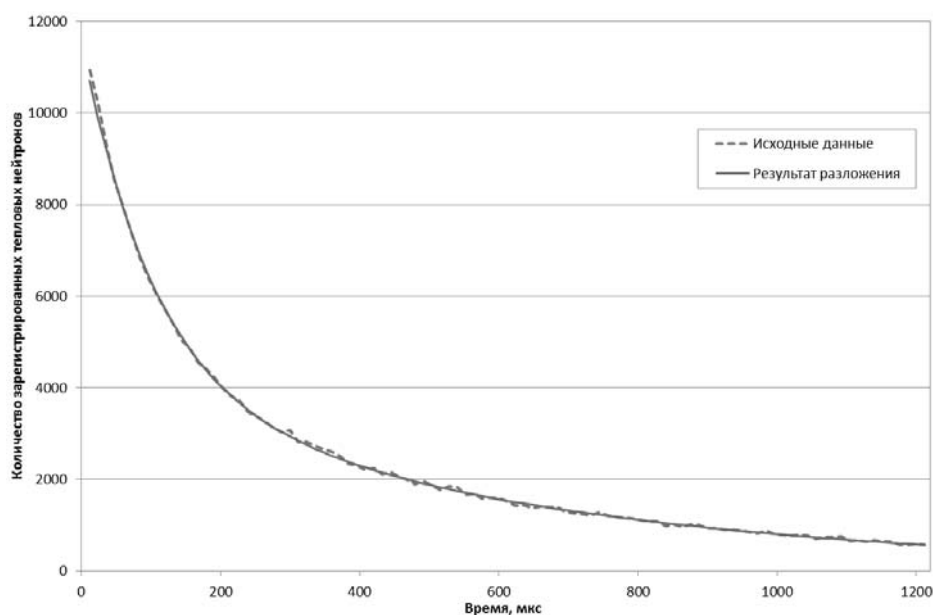


Рис. 5. Исходная кривая спада количества тепловых нейтронов (пунктирная) и кривая двухэкспоненциального приближения (сплошная) для модели СО-ПП-1 (известняк с пористостью 0.8%)

Табл. 1

№	Модель	Пористость, %	$\tau_{\text{пласта}}$ , МКС
1	СО-ПП-1	0.8	613.5
2	СО-ПП-2	15.6	556.0
3	СО-ПП-3	22.1	422.0
4	СО-ПП-4	32.2	392.3
5	Бак с водой	100.0	194.0

Обратим особое внимание на характеристики замедления, поскольку это сравнительно новый и перспективный способ определения пористости. Рассмотрим измеренные на моделях известняка характеристики замедления (рис. 4). Учтем, что длительность короткого импульса составляет 24 мкс. Видно, что в окне 24–96 мкс наблюдается сильная зависимость показаний прибора от пористости. Назовем параметром замедления (ПЗ) суммарную скорость счета в этом окне. Зависимость ПЗ от пористости карбонатных моделей приведена на рис. 7. Обратим внимание на следующие обстоятельства.

1. ПЗ для большого зонда имеет высокую чувствительность к пористости. На 99% изменения пористости ПЗ изменяется на 1000%.

2. Зависимость является степенной. Это означает, что относительные погрешности постоянны по всей шкале пористости. Данное свойство весьма интересно, поскольку для других нейтронных методов эта зависимость нелинейная, причем чувствительность снижается как раз в области реальных значений пористости продуктивных коллекторов.

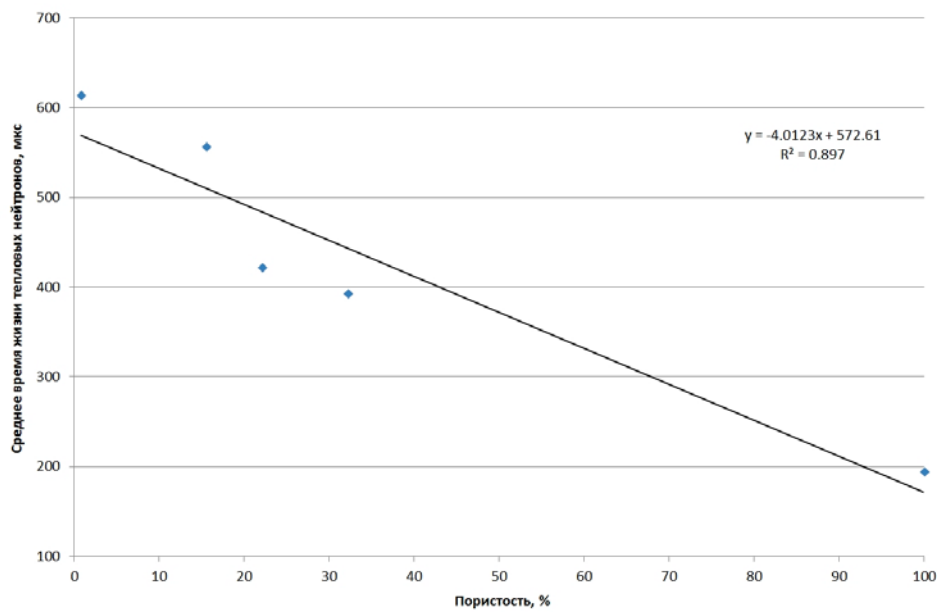


Рис. 6. Зависимость среднего времени тепловых нейтронов на дальнем зонде от пористости

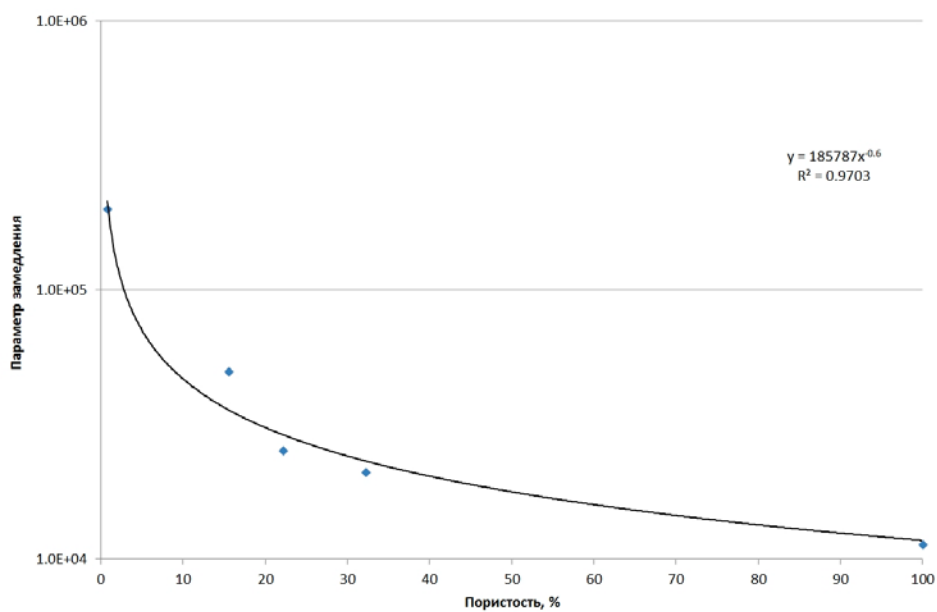


Рис. 7. Зависимость параметра замедления надтепловых нейтронов на дальнем зонде от пористости

Обращает на себя внимание недостаток данных при построении подобного рода зависимостей. На всю область пористости, присущую природным пластам-коллекторам, приходится четыре реальных точки. Однако необходимо отметить, что физическое моделирование – это очень трудоемкий и дорогостоящий процесс. К сожалению, не все геофизические характеристики могут

быть измерены на моделях. В МЦ НТУ ООО «ТНГ-Групп» имеются модели различной пористости для песчаника, известняка и доломита только для одного диаметра открытого ствола скважины – 216 мм. Поэтому необходимо привлечение математических методов (в частности, метода Монте-Карло) для получения информации о поведении кривой между точками, соответствующими реальным физическим моделям. После согласования модельных и расчетных кривых можно переходить к следующему этапу – созданию моделей с характеристиками, отличными от параметров реальных моделей (по составу, диаметру скважины, наполняющего поры флюида и т. п.).

### Заключение

Коллективом ООО «ТНГ-Групп» совместно с Казанским (Приволжским) федеральным университетом разработан аппаратно-программный комплекс, включающий новый прибор на основе высокочастотного импульсного генератора нейтронов и пакет программ для обработки показаний прибора. Этот комплекс предназначен для решения целого ряда геологических задач (выделение коллекторов, оценки пористости и характера насыщения пластов, определения положения межфлюидных контактов).

Показан пример построения петрофизических зависимостей показаний прибора от коэффициента пористости образцов. Реализована методика оценки пористости по тепловым и надтепловым нейтронам. Методика является помехоустойчивой и обладает высокой чувствительностью к пористости. Благодаря корреляции методов ИННК-Т и ИННК-НТ по четырем зондам повышается точность определения пористости пластов.

Дальнейшее направление исследований может быть связано с математическим моделированием, например с применением аппарата Монте-Карло, что позволит методом численного эксперимента получить аналоги петрофизических зависимостей в широком спектре геофизических условий.

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

### Summary

*D.I. Kirgizov, V.E. Kosarev, M.M. Alimov, B.V. Platov.* Porosity Determination Using a Multipurpose Neutron Logging Device MANK.

This paper describes a new multipurpose hardware-software system based on a high-frequency pulsed neutron generator. The main differences between this device and other pulsed neutron logging tools include: two probes, each consisting of several counters of epithermal and thermal neutrons; variable frequency and duration of fast neutron pulses. The device can measure the slowing-down time of neutrons to determine the reservoir porosity. It also allows measurement of the macroscopic thermal neutron capture cross-section. A computer optimization of the device has been carried out. A series of model and borehole measurements has shown a high sensitivity of the device to the measured parameters with a weak influence of lithology and mineralization of both borehole and formation fluids.

**Key words:** neutron generator, slowing-down of neutrons, macroscopic thermal neutron capture cross-section, porosity.



### Литература

1. *Итенберг С.С.* Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1987. – 375 с.
2. Импульсный нейтронный генератор на газонаполненной трубке для каротажной аппаратуры ИНГ-061. Описание применения. Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова. – URL: <http://www.vniia.ru/ng/karotazh.html>, свободный.
3. APS Accelerator Porosity Sonde. – URL: [http://www.slb.com/resources/other\\_resources/brochures/evaluation/aps\\_br.aspx](http://www.slb.com/resources/other_resources/brochures/evaluation/aps_br.aspx), свободный.
4. Аппаратура импульсного нейтрон-нейтронного каротажа для геофизических исследований нефтяных и газовых скважин АИНК-89. Описание применения. Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова. – URL: <http://www.vniia.ru/ng/apkarotazh.html>, свободный.
5. Ellis D.V., Singer J.M. Well Logging for Earth Scientists. – Dordrecht: Springer, 2008. – 699 p.

Поступила в редакцию  
19.09.12

---

**Киргизов Дмитрий Иванович** – кандидат технических наук, главный инженер опытно-методической партии ОМП30 Научно-технического управления ООО «ТНГ-Групп», г. Бугульма.

E-mail: [Kirgizov@tngf.tatneft.ru](mailto:Kirgizov@tngf.tatneft.ru)

**Косарев Виктор Евгеньевич** – ассистент кафедры геофизики и геоинформационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [Victor.Kosarev@ksu.ru](mailto:Victor.Kosarev@ksu.ru)

**Алимов Марс Мясумович** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИЦ «НИИММ им. Н.Г. Чеботарева» Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [Mars.Alimov@ksu.ru](mailto:Mars.Alimov@ksu.ru)

**Платов Борис Викторович** – аспирант кафедры геофизики и геоинформационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [swborispl@mail.ru](mailto:swborispl@mail.ru)