

10. Дахнов В. Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин. М.: Недра, 1981. 344 с.
11. Лежанкин С. И., Рапин В. А. Особенности интерпретации результатов промышленно-геофизических исследований в горизонтальных скважинах // Геофизика. 1994. № 2. С. 31–36.
12. Методические указания по комплексной интерпретации данных БКЗ, БК, ИК (с комплектом палеток) / Под ред. А. В. Ручкина. Калинин: Союзпромгеофизика, 1990. 85 с.
13. Пантюхин В. А., Чаадаев Е. В., Юматова Т. Г. Эквивалентность при индукционном каротаже наклонных анизотропных пластов // Изв. вузов. Геология и разведка. 1986. № 2. С. 148–151.
14. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005610807 LogWin-ЭК. 2005.
15. Сидорчук А. И., Чаадаев Е. В. Оценка влияния анизотропии на кривые КС в многослойных средах // Геология и геофизика. 1976. № 11. С. 86–94.
16. Табаровский Л. А., Эпов М. И. Электромагнитное поле гармонических источников в слоистых анизотропных средах // Геология и геофизика. 1977. № 1. С. 101–109.
17. Тихонов А. Н., Уфимцев М. В. Статистическая обработка результатов экспериментов. М.: Издательство МГУ, 1998. 174 с.
18. Чаадаев Е. В., Гайдаш А. Д., Санто К. Л., Пантюхин В. А. Индукционный каротаж наклонных анизотропных пластов // Геология и геофизика. 1980. № 10. С. 106–112.
19. Эпов М. И., Каюров К. Н., Ельцов И. Н., Сухорукова К. В. и др. Новый аппаратный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF Pro // Бурение и нефть. 2010. № 2. С. 16–19.
20. Эпов М. И., Никитенко М. Н., Сухорукова К. В., Глинских В. Н. Исследование возможностей электрического и электромагнитного каротажа в электрически макроанизотропных пластах, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2016. Вып. 2 (260). С. 64–79.
21. Эпов М. И., Никитенко М. Н., Глинских В. Н., Сухорукова К. В. Численное моделирование и анализ сигналов электромагнитного каротажа в процессе бурения // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2014. Вып. 11 (245). С. 29–42.
22. Moran J. H., Gianzero S. Effect of Formation Anisotropy on Resistivity – Logging Measurements // Geophysics. V. 44. № 7. 1979. P. 1266–1268.

*Рукопись рассмотрена на научно-техническом совете
ООО “Нефтегазгеофизика” и рекомендована к публикации*

УДК 550.832.7

*В. А. Пантюхин, В. Г. Диченко, Р. А. Нигматзянов
ООО “Нефтегазгеофизика”*

МНОГОЗОНДОВЫЙ ПРИБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАРОТАЖА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ЭК-ВР

Представлены результаты разработки прибора многозондового бокового каротажа. Приведены технические характеристики прибора и области его применения. Описано программно-методическое обеспечение регистрации и обработки данных. Показаны примеры выполненных исследований бурящихся скважин.

Ключевые слова: каротаж, электрометрия, многозондовый прибор, интерпретация, обратная задача.

Точность определения удельного электрического сопротивления (УЭС) пластов всегда была определяющим фактором при выделении коллекторов, оценке характера насыщения и определении коэффициента нефтегазонасыщенности.

Традиционные методы однозондовых (БК-3) и двухзондовых модификаций (БК-3+БК-5 и БК-7+БК9) бокового каротажа не всегда обеспечивают достаточную информацию для корректного решения этих задач.

Наибольшие ограничения наблюдаются при проведении каротажа в условиях высокоминерализованной промысловой жидкости (ПЖ), когда контрастность (отношение УЭС пород к УЭС ПЖ) достигает значений порядка 10^5 и более. Искажения записей глубинных зондов БК (БК-3 или БК-7), известные как Гронинген- и Делавар-эффекты, усугубляют проблему, а зачастую делают невозможной правильную интерпретацию данных двойного бокового каротажа.

Для повышения эффективности метода бокового каротажа ведущими каротажными компаниями разработаны многозондовые приборы БК [1, 4–6].

Учитывая наметившийся спрос на российском сервисном рынке к таким приборам, ООО “Нефтегазгеофизика” в 2013 г. приступило к разработке своей модификации скважинного прибора многозондового бокового каротажа. На основе результатов моделирования и опыта предыдущих разработок приборов двойного бокового каротажа за основу реализации многозондового прибора БК была выбрана компоновка,

которая включает в себя пять зондов типа БК-5. Для совместимости с широко используемым в российской практике ГИС в компоновку добавлен также классический зонд БК-3.

Выбор геометрических размеров электродов проводился на основе анализа псевдогеометрических факторов моделируемых зондов с целью обеспечения глубинности измерения этих зондов, сопоставимой с глубиной зондов конкурентных приборов БК [5]. Выполненные расчеты легли в основу геометрии зондовой установки разрабатываемого прибора. В результате был разработан скважинный прибор ЭК-ВР-76 на каротажном кабеле. Этот прибор позволяет проводить измерения КС пятью разноглубинными зондами бокового каротажа БК-5 и одним зондом бокового каротажа БК-3. Дополнительно измеряется потенциал ПС. Прибор ЭК-ВР-76 может эксплуатироваться как самостоятельно, так и в комплексе с другими геофизическими приборами серии "Каскад" производства ООО "Нефтегазгеофизика".

На рис. 1 приведена схема скважинного прибора.

Прибор состоит из следующих устройств (блоков):

- устройство зондовое БК (состоит из 3 сборочных единиц);
- соединительное устройство (шарнирное);
- блок удаленного электрода;
- головка переходная ЭК-ВР, используемая при работе без блока удаленного электрода.

Устройство зондовое БК (в дальнейшем – УЗ БК) представляет собой набор изолированных электродов, корпуса которых выполнены из стали, изоляционные промежутки между электродами зондов покрыты слоем резины. По обе стороны от УЗ БК находятся электрические изоляторы с расположенными на них контрольными измерительными электродами $N_{к1}$ и $N_{к2}$. Сигналы, полученные с электродов $N_{к1}$ и $N_{к2}$, после математической обработки данных ГИС используются для компенсации асимметрии работы УЗ БК, которая возникает при работе прибора в пластах с большой разницей УЭС.

Зонд БК-3 питается относительно обратного токового электрода В, расположенного на дневной поверхности.

На блоке удаленного электрода располагаются электроды $N_{уд}$ и электрод измерения ПС.

Фокусировка зондов достигается эквипотенциальностью поверхности корпуса прибора и реализована по схеме зондов БК-5 и БК-3. Зонды прибора симметричны, разноглубинность измерений достига-

ется за счет поочередного включения диполей от БК-5/1 до БК-5/5. При замыкании всех групп электродов организуется зонд БК-3.

Основные технические характеристики прибора приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики прибора ЭК-ВР-76

Максимальный диаметр, мм	76
Общая длина, мм, не более	15 300
Общая масса, кг, не более	290
Напряжение питающего тока частотой $50 \pm 0,5$ Гц	220 ± 22 В
Потребляемая мощность, Вт, не более	15
Диаметр исследуемых скважин, мм	110–350
Удельное сопротивление промывочной жидкости, Ом·м	0,02–20
Диапазон рабочих температур, °С	–10, +120
Рабочее давление (max), МПа	80
Время непрерывной работы, ч, не более	10
Время работы при максимальной температуре, ч, не более	4
Скорость каротажа, м/ч, не более	1500
Комбинируемость	Транзитный
Положение в скважине	С отклонителями
Максимальная частота записи, Гц	2

Предусмотрены несколько режимов работы прибора. В зависимости от условий проведения измерений может быть выбран один из следующих режимов:

- при сложных геологических условиях изучаемой скважины запись может производиться с использованием блока удаленного электрода длиной 4 м, на котором установлены удаленный электрод ($N_{уд}$) и электрод потенциала самопроизвольной поляризации (ПС);
- в более простых геолого-технических условиях может использоваться более короткая конфигурация прибора без использования блока удаленного электрода.

Ниже приведены схема переключения питания электродов зондовой установки (рис. 2) и порядок выполнения подключения зондов прибора к генератору G (табл. 2).

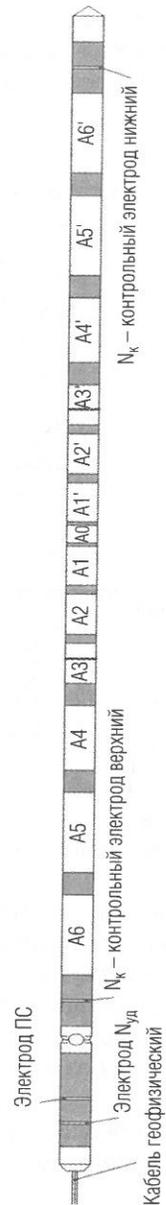


Рис. 1. Схема зондового устройства скважинного прибора ЭК-ВР-Т-76-120/80

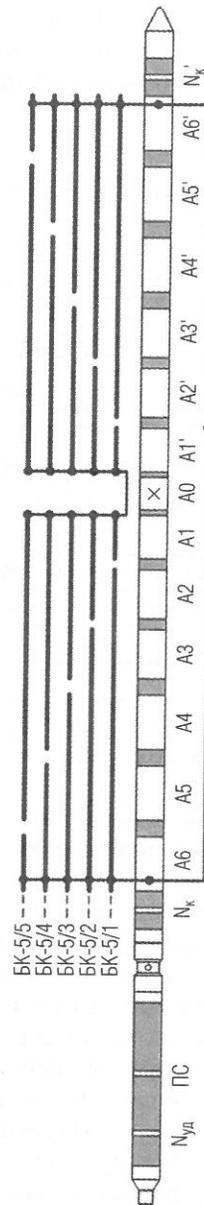


Рис. 2. Схема зондовой установки прибора ЭК-ВР-76. Схема переключения зондов

Таблица 2

Порядок подключения токовых электродов зондов прибора к генератору G. Диапазоны измерений и пределы допускаемой основной погрешности измерений КС

Зонд	Алгоритм питания зондов	Диапазон измерений, Ом·м	Основная погрешность измерений
БК-5/1	$A_1-G-A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ $A_1'-G-A_2', A_3', A_4', A_5', A_6'$	0,2–5000	±5%
БК-5/2	$A_1, A_2-G-A_3, A_4, A_5, A_6$ $A_1', A_2'-G-A_3', A_4', A_5', A_6'$		
БК-5/3	$A_1, A_2, A_3-G-A_4, A_5, A_6$ $A_1', A_2', A_3'-G-A_4', A_5', A_6'$		
БК-5/4	$A_1, A_2, A_3, A_4-G-A_5, A_6$ $A_1', A_2', A_3', A_4'-G-A_5', A_6'$		
БК-5/5	$A_1, A_2, A_3, A_4, A_5-G-A_6$ $A_1', A_2', A_3', A_4', A_5'-G-A_6'$		
БК-3	$A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6-G-B$ $A_1', A_2', A_3', A_4', A_5', A_6'-G-B$	0,2–20 000	±5%

Вертикальное разрешение зондов составляет 0,165 м. Радиусы исследования зондов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Радиусы исследования и вертикальное разрешение зондов

Зонд	Радиус исследования R, м	
	При повышающем проникновении ($\rho_{zn}/\rho_c = 100, \rho_n/\rho_c = 10$)	При понижающем проникновении ($\rho_{zn}/\rho_c = 10, \rho_n/\rho_c = 100$)
LQ-1 (БК-5/1)	0,29	0,22
LQ-2 (БК-5/2)	0,38	0,32
LQ-3 (БК-5/3)	0,45	0,40
LQ-4 (БК-5/4)	0,53	0,50
LQ-5 (БК-5/5)	0,62	0,62
LQ-6 (БК-3)	0,89	0,85

Примечание: $\rho_n, \rho_{zn}, \rho_c$ – УЭС неизменной части пласта, зоны проникновения и промывочной жидкости соответственно.

Реализованная зондовая установка прибора ЭК-ВР позволяет проводить исследования при УЭС бурового раствора от 0,02 до 20 Ом·м.

Для улучшения качества получаемого материала при работе в скважинах необходимо использовать отклонители известного диаметра из состава поставки аппаратуры.

В 2015 г. совместно с ОАО “Когалымнефтегеофизика” проведены опытно-методические работы в сложных геолого-технических условиях ($\rho_c = 0,05-0,06$ Ом·м) месторождений Западной и Восточной Сибири, которые подтвердили соответствие аппаратуры заявленным характеристикам.

Исследовалась работа прибора как поодиночке, так и в различных связках. Определялось влияние отклонителей и центраторов на показания коротких зондов.

На рис. 3 приведена запись прибором ЭК-ВР на одном из месторождений Западной Сибири, на рис. 4 – Восточной Сибири.

Для сравнения в тех же интервалах глубин в обеих скважинах были проведены записи аппаратурой ЭК-73ПЛ.

В апреле – мае 2016 г. были выполнены работы прибором ЭК-ВР на месторождениях Восточной Европы совместно с ГУП “Белоруснефть”. Каротажные работы производились в сложных геолого-технических условиях ($\rho_c = 0,02-0,03$ Ом·м, отношение $\rho_n/\rho_c > 100\ 000$). При проведении каротажей оценивалось влияние расположения отклонителей различных диаметров на показания зондов и проверялось программное обеспечение, позволяющее оценить поправки, вносимые в показания зондов при обработке данных каротажа, рассчитанные с учетом положения прибора в скважине при использовании отклонителей различных диаметров.

На рис. 5 приведена запись прибором ЭК-ВР на месторождении Восточной Европы.

Как видно, на представленных записях кривые зондов ЭК-ВР показывают хорошую сходимость и повторяемость в основной и повторной записи и коррелируют с кривыми БК, записанными прибором ЭК-73ПЛ и другими приборами ЭК.

После обработки материала и введения поправок за скважину по данным ЭК-ВР хорошо выделяются зоны проникновения (выделено синим цветом), появляется возможность рассчитать значения УЭС пласта и относительный диаметр зоны проникновения.

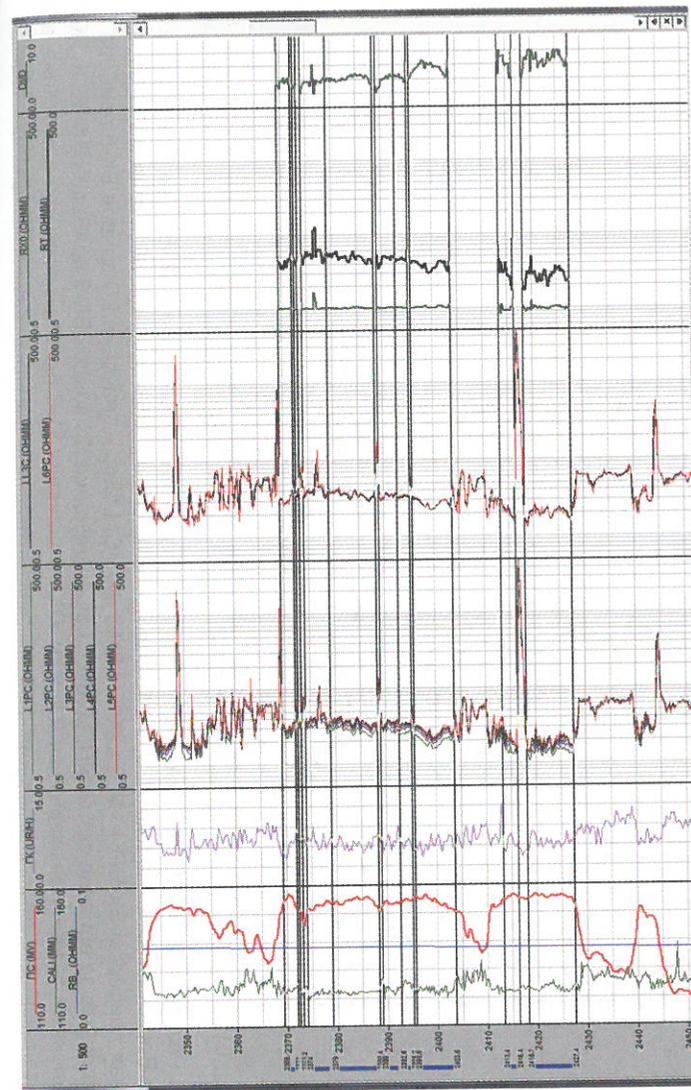


Рис. 3. Результаты обработки данных БК, зарегистрированных приборами ЭК-ВР (запись с переводником) и ЭК-73ПЛ в Западной Сибири (скв. 1, $d_n = 123$ мм; $\rho_c = 0,06$ Ом·м). Обозначения: ПС – кривая ПС, зарегистрированная прибором ЭК-73ПЛ; L1PC, L2PC, L3PC, L4PC, L5PC – значения КС зондов БК-5 прибора ЭК-ВР, исправленные за влияние скважины; L6PC, LL3C – значения КС зондов БК-3 приборов ЭК-ВР и ЭК-73ПЛ, исправленные за влияние скважины; RT, RX0, D/D – значения УЭС пласта и зоны проникновения и относительный диаметр зоны проникновения, рассчитанные по данным зондов БК прибора ЭК-ВР

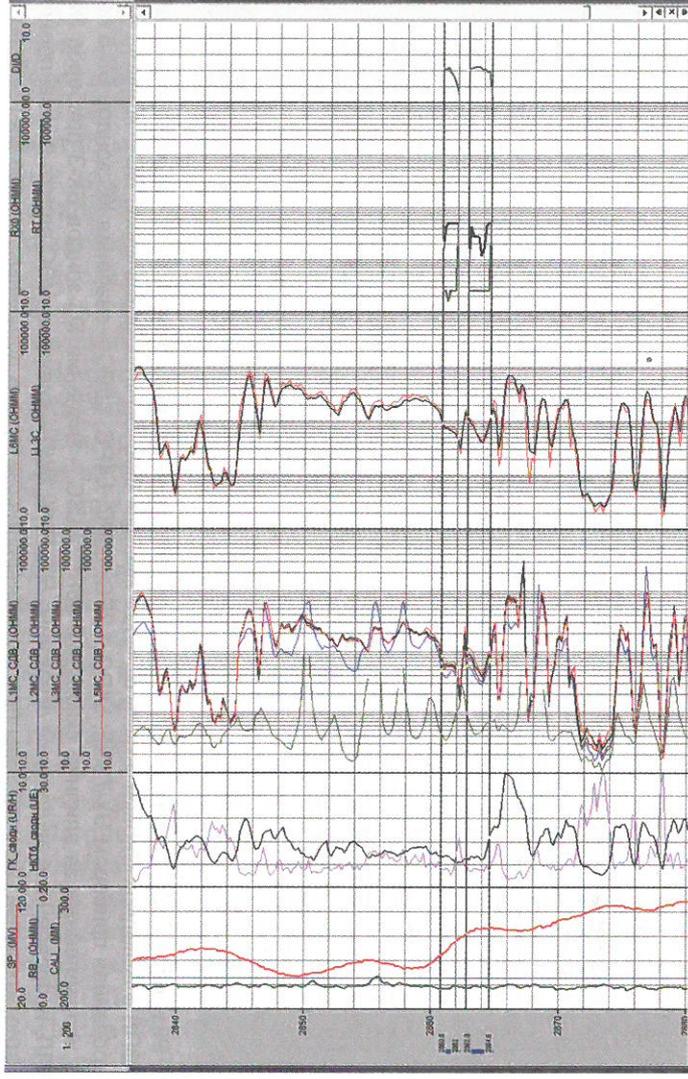


Рис. 4. Результаты обработки данных БК, зарегистрированных приборами ЭК-ВР (запись с косой) и ЭК-73ПЛ в Восточной Сибири (скв. 2, $d_n = 216$ мм; $\rho_c = 0,05$ Ом·м). Обозначения: SP – кривая ПС, зарегистрированная прибором ЭК-ВР; L1MS, L2MS, L3MS, L4MS, L5MS – значения КС зондов БК-5 прибора ЭК-ВР, исправленные за влияние скважины; L6MS, L13C – значения КС зондов БК-3 приборов ЭК-ВР и ЭК-73ПЛ, исправленные за влияние скважины; RT, RX0, DI/D – значения УЭС пласта и зоны проникновения, а также относительный диаметр зоны проникновения, рассчитанные по данным зондов БК прибора ЭК-ВР

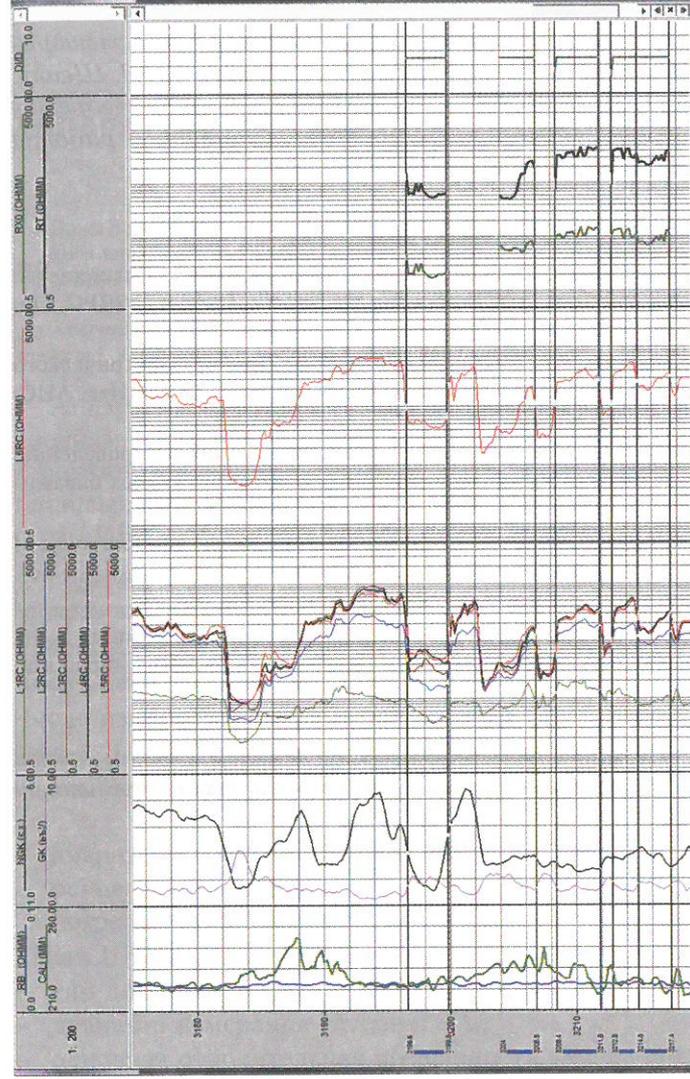


Рис. 5. Результаты обработки данных БК, зарегистрированных прибором ЭК-ВР (запись с электрическим разделителем) в Восточной Европе (скв. 3, $d_n = 216$ Ом·м; $\rho_c = 0,025$ Ом·м). Запись с отклонителями диаметром 141 мм. Обозначения: L1RC, L2RC, L3RC, L4RC, L5RC – значения КС зондов БК-5 прибора ЭК-ВР, исправленные за влияние скважины; L6RC – значение КС зонда БК-3 прибора ЭК-ВР, исправленное за влияние скважины; RT, RX0, DI/D – значения УЭС пласта и зоны проникновения и относительный диаметр зоны проникновения, рассчитанные по данным зондов БК прибора ЭК-ВР

Результаты проведенных опытно-промышленных работ подтвердили соответствие прибора ЭК-ВР заявленным характеристикам.

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела электрического и электромагнитного каротажа Б. В. Рудяку, Ю. Л. Шеину, О. М. Снежко и Л. И. Павловой за проведение работ по теоретическому обоснованию, математическому моделированию работы прибора и методике его применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Открытая презентация компании Schlumberger "Laterolog Tools&Measurements: Environmental Effects and Tool Data Processing" // Isabelle Dubourg, SRPC, December 2003.
2. Салахов Т. Р., Юлмухаметов К. Р., Клименко В. А. Прибор электрического многоэлектродного бокового каротажа // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2015. Вып. 11 (257). С. 71–80.
3. Хаматдинов Р. Т., Козяр В. Ф. и др. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ на кабеле в нефтяных и газовых скважинах. М., 2001.
4. Barbara Ina Anderson. Modeling and Inversion Methods for the Interpretation of Resistivity Logging Tool Response // DUP Science, October 2001.
5. HRLA High-Resolution Laterolog Array Tool. Schlumberger.
6. Real-Time Openhole Evaluation (Обработка результатов исследования в открытом стволе в режиме реального времени). Группа авторов США, Франции, Италии и др. 1999.

Рукопись рассмотрена на научно-техническом совете ООО "Нефтегазгеофизика" и рекомендована к публикации

УДК 550.832.54

В. А. Велижанин, В. А. Беляков, А. А. Волнухина,
Д. Р. Лобода, С. Ф. Слепнев, Г. К. Точиленко
ООО "Нефтегазгеофизика"

АППАРАТУРА ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО КАРОТАЖА АИНК-76П

Даны основные технические характеристики аппаратуры импульсного нейтронного каротажа, выявлены зависимости от скорости каротажа, представлены результаты скважинных испытаний.

Ключевые слова: импульсная нейтронная аппаратура, пористость, сечение захвата, скважинные исследования.

Аппаратура АИНК-76П с зондовой установкой 2ИННК-НТ+ИННК-Т предназначена для проведения импульсного нейтрон-нейтронного каротажа с целью определения пористости и сечения поглощения тепловых нейтронов в разрезах нефтяных и газовых скважин. Аппаратура АИНК-76П характеризуется параметрами, приведенными ниже:

Длина, мм	3250
Максимальный диаметр, мм	76
Скорость каротажа, м/ч	400–800
Число регистрируемых каналов	3
Число измеряемых параметров	2
Канал 2ИННК-НТ измерения пористости:	
– тип детектора	СНК-30/120-4,6/л, СНК-30/260-4,6/л
– диапазон измерения пористости, %	0–40
– основная относительная погрешность измерений, %	4,2 + 2,3 (40/ k_n – 1)
Канал ИННК-Т измерения сечения захвата:	
– тип детектора	СНК-30/120-4,6/л
– диапазон измерения сечения, с. и.	4–30
– основная относительная погрешность измерений, %	±2,5
Диапазон рабочих температур, °С	–10–120
Верхнее значение рабочего гидростатического давления, МПа	80