

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,<br>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                                    |

Скорость счета в воде гелиевых счетчиков нейтронов при мощности источника  $5 \times 10^7$  н/с составляет:

- по зонду ИННК-НТ-МЗ – не менее 150 000 имп/мин;
- по зонду ИННК-Т – не менее 250 000 имп/мин;
- по зонду ИННК-НТ-БЗ – не менее 15 000 имп/мин.

На рис. 1 приведена основная зависимость зонда 2ИННК-НТ аппаратуры АИНК-76П для открытого ствола. Значение  $A$  определяется выражением

$$A(k_p) = (N_{МЗ}(k_p)/N_{БЗ}(k_p))/(N_{МЗ}(k_p = 100)/N_{БЗ}(k_p = 100)),$$

где  $N_{МЗ}(k_p)$ ,  $N_{БЗ}(k_p)$  – показания малого (МЗ) и большого (БЗ) зондов в имп/мин в пласте с пористостью  $k_p$ ;  $N_{МЗ}(k_p = 100)$ ,  $N_{БЗ}(k_p = 100)$  – показания малого и большого зондов в воде. Основная зависимость 2ИННК-НТ описывает связь между пористостью известняка, представленного чистым кальцитом с плотностью  $2,71$  г/см<sup>3</sup>, и показаниями  $A$  аппаратуры в условиях, принятых за стандартные, а именно:

- поры породы заполнены пресной водой с плотностью  $1,00$  г/см<sup>3</sup>;
- скважина диаметром  $196$  мм заполнена пресной водой;

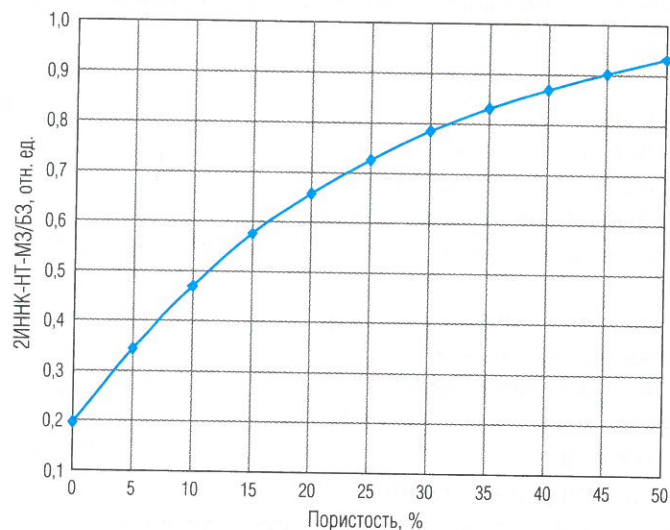


Рис. 1. Основная зависимость зонда 2ИННК-НТ аппаратуры АИНК-76П для открытого ствола

- глинистая корка отсутствует, прибор лежит на стенке скважины;
- температура окружающей среды  $20$  °С, давление  $0,1$  МПа.

Пониженная дифференциация параметра  $A$  от пористости породы при  $k_p$  более 35% является следствием этапа неупругого замедления нейтронов с начальной энергией  $14,1$  МэВ, сечение которого (неупругого рассеяния) в отложениях осадочного комплекса в значительной степени определяется их плотностью.

Учет влияния скважинных условий измерений на показания  $A$  зонда 2ИННК-НТ аппаратуры АИНК-76П выполняется путем многомерной аппроксимации, что обеспечено наличием интерпретационных зависимостей за влияние диаметра скважины в диапазоне  $120$ – $350$  мм, плотности и минерализации промывочной жидкости (ПЖ) в диапазоне  $1,0$ – $1,8$  г/см<sup>3</sup> и  $0$ – $250$  г/л NaCl соответственно, промежуточной среды между прибором и стенкой скважины. Кроме того, зонд 2ИННК-НТ обеспечен поправками за влияние минерального состава породы.

Для работы в обсаженном стволе с целью оценки пористости породы аппаратура АИНК-76П также обеспечена соответствующими интерпретационными зависимостями и поправками.

Основная зависимость зонда ИННК-Т аппаратуры АИНК-76П, описывающая связь между пористостью известняка (кальцита) и значением сечения поглощения  $\Sigma_{пл}$  в скважине диаметром  $196$  мм, приведена на рис. 2. Значение  $\Sigma_{пл}$  определяется в рамках двухкомпонентной модели, описываемой выражением

$$N(t) = A_{скв} \times \exp(-t/\tau_{скв}) + A_{пл} \times \exp(-t/\tau_{пл}),$$

где  $\tau_{скв} = 4550/\Sigma_{скв}$  – время жизни нейтронов в скважине (ближней зоне);  $\tau_{пл} = 4550/\Sigma_{пл}$  – время жизни нейтронов в пласте;  $A_{скв}$ ,  $A_{пл}$  – амплитуды этих зон при разложении временного спектра соответственно. На рис. 2 также приведена теоретическая зависимость сечения поглощения от пористости кальцита. Пример разложения временного спектра в рамках двухкомпонентной модели приведен на рис. 3.

Переход от  $\Sigma_{пл}$  к истинному значению сечения поглощения породы  $\Sigma_a$  выполняется в рамках модели [4, 5]

$$\Sigma_a = \Sigma_{пл} + \Delta\Sigma_{dif}$$

по зависимостям, полученным для скважин диаметром от  $120$  до  $350$  мм при минерализации ПЖ до  $300$  г/л NaCl. Здесь  $\Delta\Sigma_{dif}$  – диффузионная поправка.

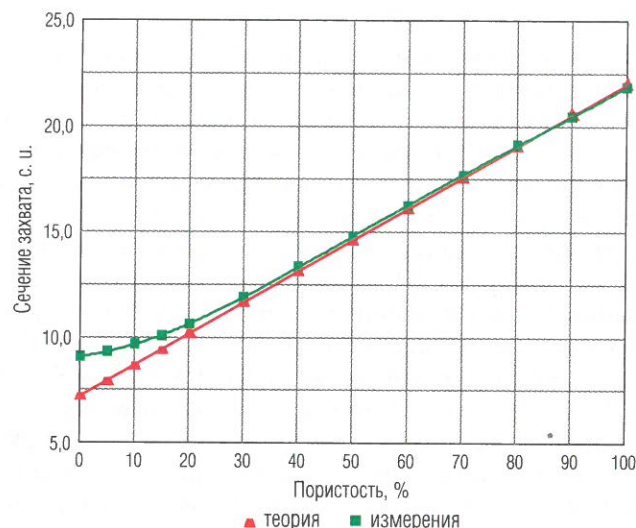


Рис. 2. Основная зависимость зонда ИННК-Т аппаратуры АИНК-76П для открытого ствола

Скважинные испытания аппаратуры АИНК-76П проводились на месторождениях Белоруссии. На рис. 4 приведены результаты основного и повторного замеров, выполненных в скважине диаметром 295 мм при минерализации промывочной жидкости в диапазоне 250–300 г/л NaCl. Несмотря на весьма непростые условия измерений (большой диаметр скважины и высокая минерализация ПЖ), ошибка определения сечения поглощения по повторному замеру (приведенная к одному метру) в регламентированном диапазоне измерений от 4 до 30 с. и. не превысила 1,5% отн. Погрешность определения  $k_n$  по повторному замеру также заметно меньше тех значений, которые предъявляются технической инструкцией к оценке пористости стационарными нейтронными методами [3]. На рис. 5 приведены результаты замеров, выполненных в скважине диаметром 216 мм при минерализации промывочной жидкости в диапазоне 250–300 г/л NaCl. Основной замер выполнен на скорости 300 м/ч, повторный замер — на скорости 600 м/ч. Расчетные кривые сечения поглощения и пористости породы для разных скоростей записи хорошо повторяют друг друга.

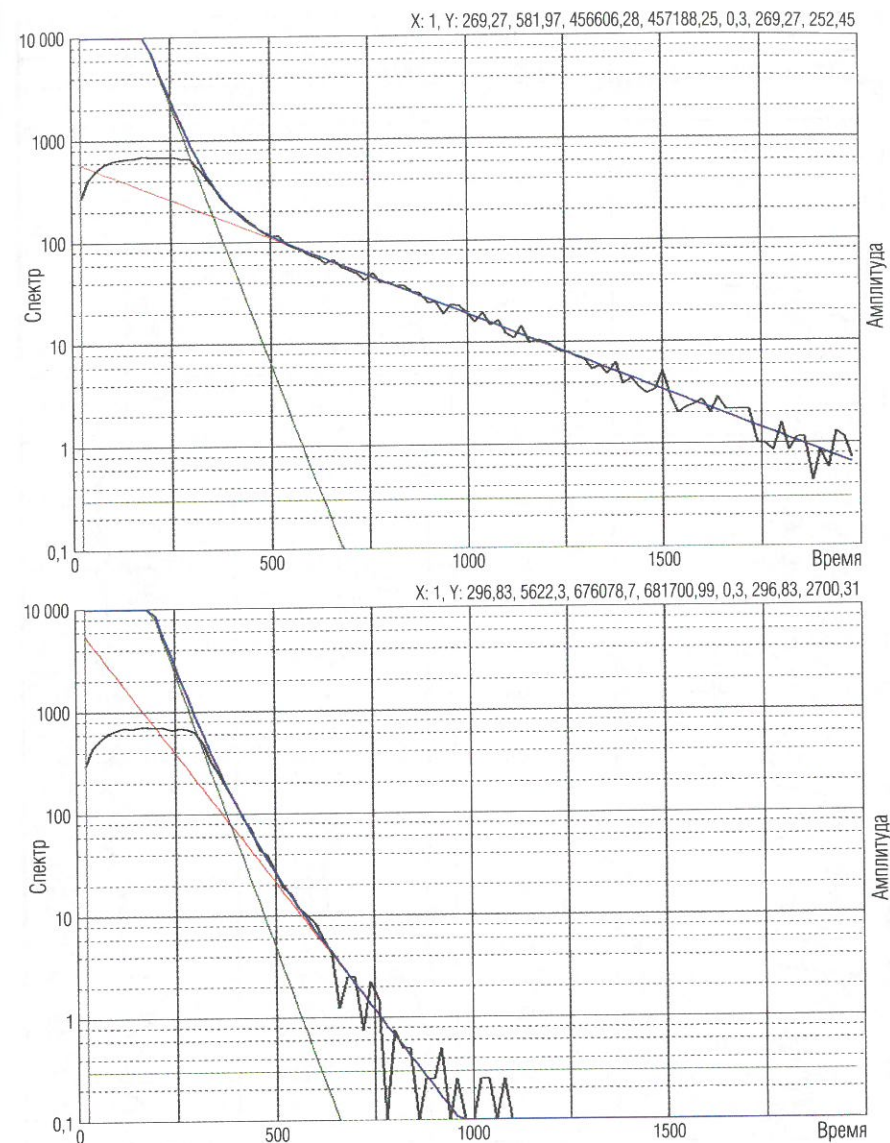


Рис. 3. Пример разложения временного спектра аппаратуры АИНК-76П в рамках модели «скважина—пласт» в слабо- и сильнопоглощающих пластах

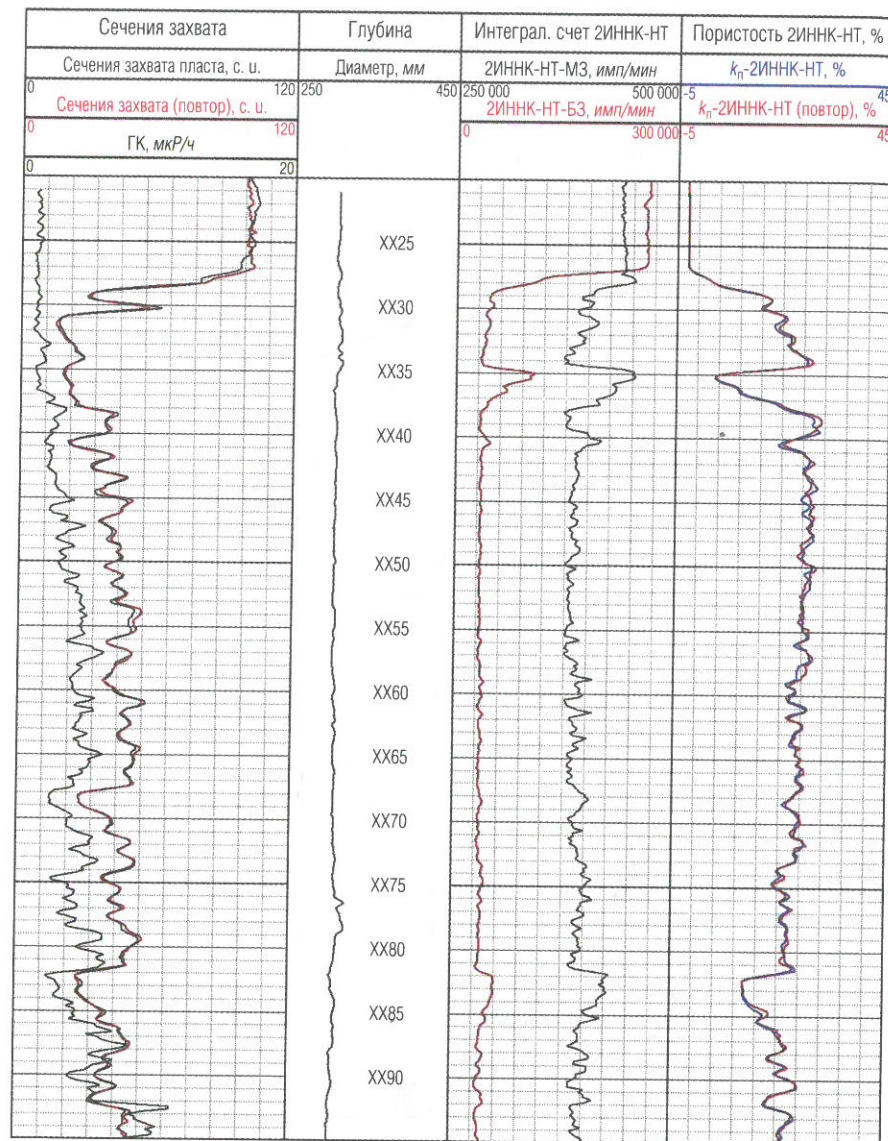


Рис. 4. Пример записи аппаратурой АИНК-76П (диаметр скважины 295 мм, минерализация ПЖ 250–300 г/л NaCl, скорость каротажа 300 м/ч)

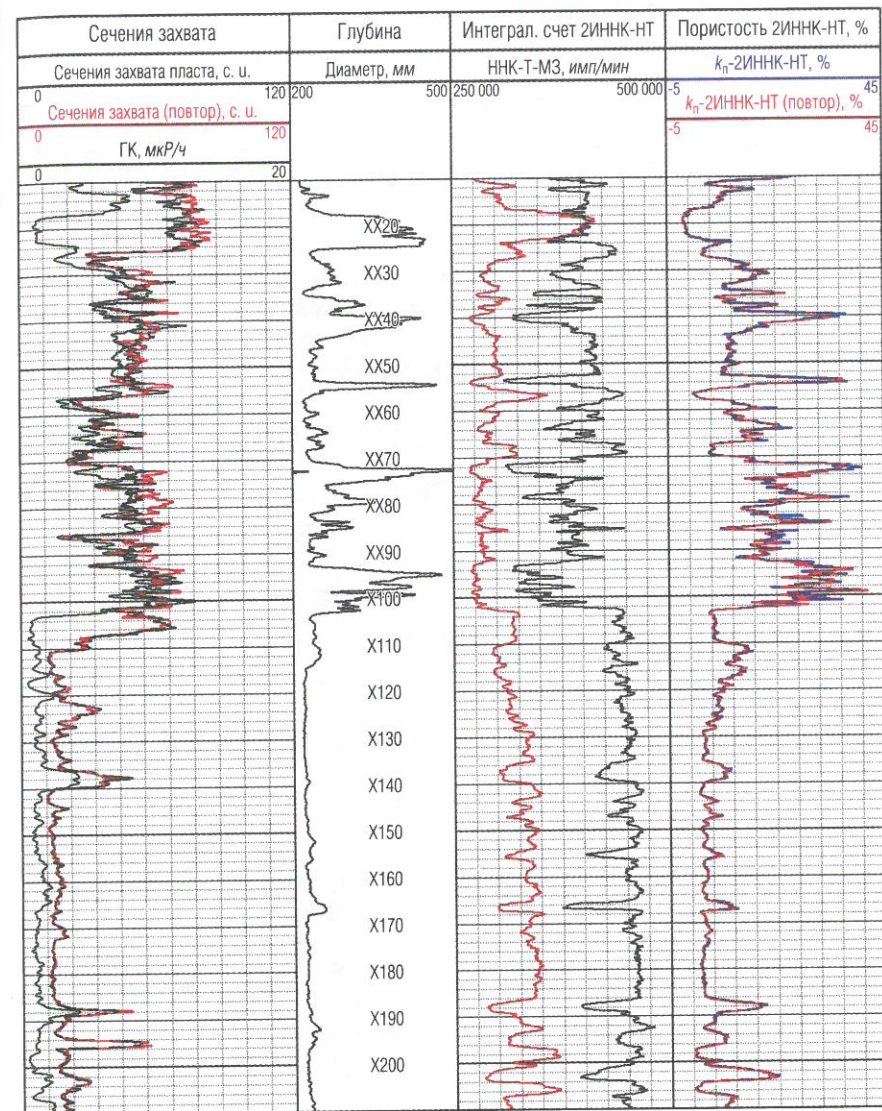


Рис. 5. Пример записи аппаратурой АИНК-76П (диаметр скважины 216 мм, минерализация ПЖ 250–300 г/л NaCl, скорость каротажа основного замера 300 м/ч, скорость каротажа повторного замера 600 м/ч)

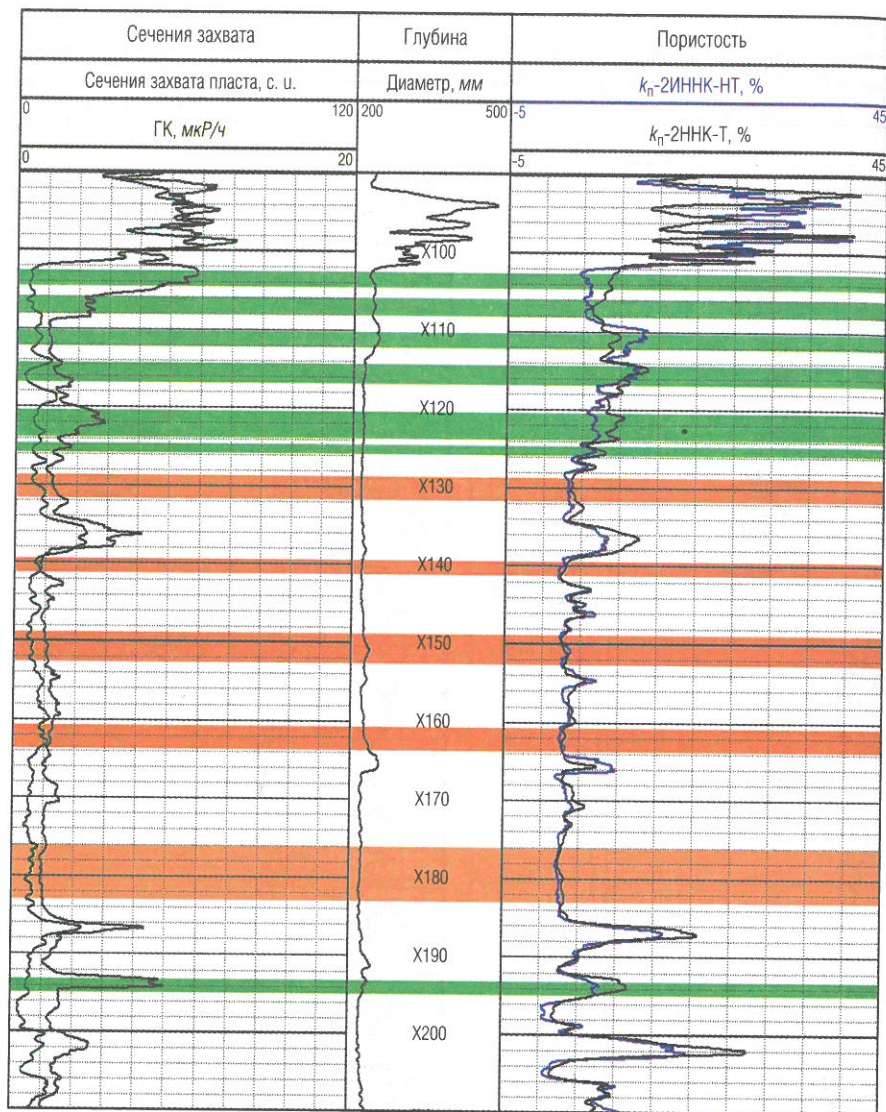


Рис. 6. Пример сопоставления кривых пористостей по нейтронному каротажу, полученных зондами 2ИННК-НТ (АИНК-76П) и 2ННК-Т (СРК-76). Светло-коричневым цветом выделены пласты известняка, зеленым – пласты доломита

Погрешность определения сечения поглощения (приведенная к одному метру) в диапазоне измерений от 4 до 30 с. и. не превысила 2% отн., а погрешность определения  $k_p$  (приведенная также к одному метру записи) на участках неразмытого ствола скважины не превысила 0,5% абс.

На рис. 6 приведено сопоставление кривых пористостей по нейтронному каротажу, полученных зондами 2ИННК-НТ (АИНК-76П) и 2ННК-Т (СРК-76). Светло-коричневым цветом на диаграмме выделены пласты известняка, зеленым – пласты доломита. Значения пористостей зондов хорошо согласуются в пластах известняка и заметно различаются в пластах доломита. Отличие измеряемых значений пористости в пластах доломита обусловлено двумя факторами. Во-первых, различным влиянием доломитизации породы на показания зондов 2ИННК-НТ (АИНК-76П) и 2ННК-Т (СРК-76) [1, 2]. Во-вторых, существенным влиянием сечения захвата породы на показания зонда 2ННК-Т (СРК-76) [1], которое в пластах доломита очень сильно изменяется (рис. 6). Простой учет этих двух факторов при расчете пористости по данным зондов 2ИННК-НТ (АИНК-76П) и 2ННК-Т (СРК-76), в предположении равенства минерализации промывочной и пластовой жидкости, обеспечивает хорошую их сходимость.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по проведению импульсного нейтронного каротажа аппаратурой АИНК-76П и обработке результатов измерений / В. А. Велижанин, В. А. Беляков, А. А. Волнухина, Н. Г. Лобода и др. Тверь, 2015.
2. Инструкция по проведению нейтронного и гамма-каротажа аппаратурой СРК-76 и обработке результатов измерений. МИ 41-17-1400-04 / В. А. Велижанин, Н. Г. Лобода, Г. К. Точилко и др. Тверь, 2004.
3. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах. М., 2001. 271 с.
4. Шимелевич Ю. С., Кантор С. А., Школьников А. С. и др. Физические основы импульсных нейтронных методов исследования скважин. М.: Недра, 1976. 160 с.
5. Ellis D. V., Singer J. M. Well Logging for Earth Scientists. Springer, 2008.

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