

Л.Н. Воронков, В.А. Лифантьев, Р.И. Юсупов, В.В. Баженов, Д.И. Киргизов  
АО "Татнефтегеофизика", г. Бузульма  
ntung@vkptus.ru

# НОВЫЕ ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АППАРАТУРЫ АИНК36-3Ц ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАЗРАБОТКИ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СКВАЖИН

Управляемые импульсные источники нейтронов (генераторы нейтронов) широко используются при геофизических исследованиях нефтяных и газовых скважин для решения различных геолого-промысловых задач. Рассматриваемый в докладе аппаратно-программный комплекс (АПК) предназначен для каротажных исследований продуктивных нефтегазосодержащих горных пластов с целью оценки их текущей нефтенасыщенности, определения водонефтяного контакта, определения интервалов обводнения в добывающих скважинах и оценки удельных расходов воды в нагнетательных скважинах. Сверхминиатюрный каротажный зонд диаметром 36 мм реализует импульсный нейтронный гамма каротаж (ИНГК) тремя детекторами гамма-квантов ( $\gamma$ -квантов) и нейтронно-активационный каротаж  $\gamma$ -квантов. Благодаря оригинальной геометрии зонда, с использованием рассматриваемого АПК удастся в добывающих и нагнетательных скважинах выявлять встречные потоки водосодержащих флюидов и оценивать их интенсивности (расходы).

## 1. Введение

Импульсные источники нейтронов, выполненные в виде каротажных зондов, начиная с 60-х годов широко используются при каротаже нефтяных и газовых скважин. Обычно они являются основой каротажных зондов ИНК, в которых используются, как правило, 2-х детекторные установки для регистрации временных спектров  $\gamma$ -квантов радиационного захвата тепловых нейтронов.

После обработки этих временных спектров получают нейтронные параметры исследуемого продуктивного пласта:

- $\Sigma$  – макросечение поглощения тепловых нейтронов;
- $L_3$  – длину замедления быстрых (14 МэВ) нейтронов;
- $D$  – коэффициент диффузии тепловых нейтронов.

Так как нейтронные параметры контролируются соответствующими петрофизическими параметрами, а именно,  $\Sigma$  – нефтенасыщенностью (при достаточной минерализации пластовой воды),  $L_3$  и  $D$  – общей пористостью пласта, то при измерении нейтронных параметров определяют общую пористость и нефтенасыщенность продуктивного пласта.

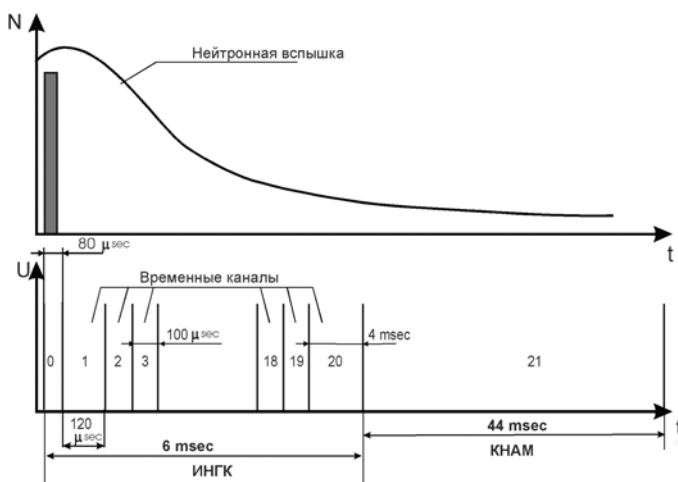


Рис. 1. Режимы измерения аппаратуры АИНК36-3Ц.

Второе полезное использование каротажного зонда на основе импульсного источника нейтронов – нейтронно-активационный каротаж, прежде всего, регистрация наведенной активности ядер кислорода (КНАМ). Этот метод с конца 60-х годов используется для определения интервалов обводнения в нефтедобывающих скважинах и выявления возможных заколонных перетоков воды к интервалам перфорации.

Разработанный в 1999 г. АПК АИНК36-3Ц (аппаратура импульсного нейтронного каротажа с каротажным зондом диаметром 36 мм, содержащим три детектора  $\gamma$ -излучения), который рассматривается в настоящей статье, оптимально реализует КНАМ и на достаточно современном уровне – ИНГК.

## 2. Режимы работы АИНК36-3Ц

Аппаратура АИНК36-3Ц функционирует в одном из трех режимов (рис. 1), выбираемых оператором каротажной лаборатории:

- а) режим ИНК;
- б) режим ГК;
- в) режим работы в точке по определению перетоков.

Этот режим отличается от предыдущих тем, что здесь совмещены оба режима работы. Оператор определяет время работы нейтронной трубки, а также длительность временных окон суммирования и количество циклов повторения замеров, т.е. по сигналу с бортового компьютера на время, заданное оператором, подается питающее напряжение по 3 жиле (НГК). Затем оно снимается (ГК) и в зависимости от длительности выбранного временного окна (0,1÷0,9 с) происходит регистрация информации в 60 временных окнах с выводом на экран монитора. В зависимости от полученных результатов, оператор, варьируя длительностью работы нейтронной трубки, длительностью временного окна и количеством циклов регистрации, добивается получения качественной информации о скорости движения жидкости в колонне и заколонных перетоков.

### 3. Физические и технологические принципы использования АПК АИНК36-3Ц

#### 3.1. Определение общей пористости и нефтенасыщенности по ИНГК

Как рассматривалось выше (см. Раздел 2), в аппаратно-программном комплексе АИНК36-3Ц используется импульсный источник нейтронов, обеспечивающий “вспышки” быстрых (14 МэВ) нейтронов длительностью 1-2 мкс с периодом повторения 50 мс. В интервале времен от 100 до ~ 3000 мкс измеряются временные спектры  $\gamma$ -излучения радиационного захвата, зарегистрированные детекторами  $D_1$  и  $D_2$ . Затем, используя математическую гипотезу вида:

$$N_i(t) = a_{w,i} \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_{w,i}}\right) + a_{c,i} \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_{c,i}}\right), \quad i=1,2 \quad (1)$$

где  $a_{w,i}$ ,  $\tau_{w,i}$  - соответственно амплитуда и время жизни скважинной компоненты для  $i$ -го детектора;

$a_{c,i}$ ,  $\tau_{c,i}$  - то же для пластовой компоненты, определяют времена жизни пластовой компоненты  $\tau_{c,1}$  и  $\tau_{c,2}$ .

При обработке результатов измерений график зависимости  $\tau$  от глубины для прямого зонда (зонд 60) можно получить следующим образом. Произвести соответствующий сдвиг по глубине к одной точке записи исходных данных (счета) по прямому и обратному зонду (зонд 60 и зонд 60 обратный). И по полученным данным произвести расчёт  $\tau$ . Поканальное сложение данных прямого и обратного зондов 60, приведённых к одной точке записи, эквивалентно увеличению объёма сцинтиляционного детектора примерно в два раза. Изменение технологии регистрации и обработки позволяет повысить точность определения  $\tau$  и, соответственно, связанных с ним петрофизических параметров пласта-коллектора.

Затем по известным алгоритмам определяют общую пористость и нефтенасыщенность.

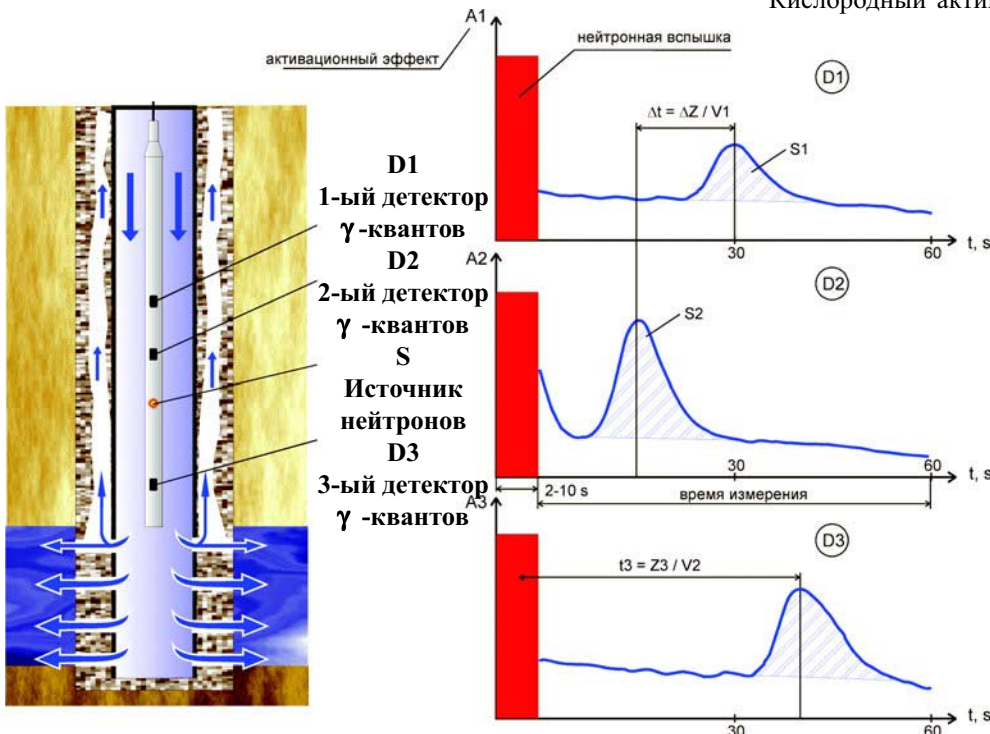


Рис. 3. Измерение встречных потоков методом КНАМ в нагнетательной скважине.

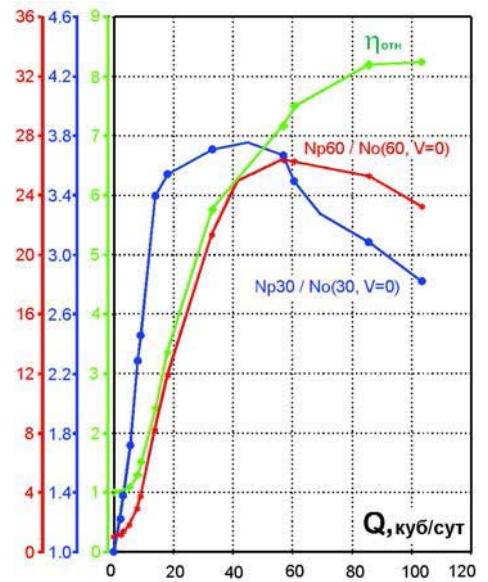


Рис. 2. Графики зависимости счёта гамма-квантов от расхода жидкости.

#### 3.2. Определение расходов воды и перетоков ее за колонной в нефтяных добывающих и нагнетательных скважинах по кислородному нейтронно-активационному методу (КНАМ)

При облучении быстрыми нейтронами сред, содержащих кислород  $^{16}\text{O}$ , в результате реакции  $^{16}\text{O}(\text{пр})^{16}\text{N}$  образуется искусственная радиоактивность. Порог реакции равен 10.2 МэВ, период полураспада изотопа  $^{16}\text{N}$  равен 7.35 сек. В результате бета-распада ядер азота  $^{16}\text{N}$  испускаются гамма-кванты с энергией 6.13 МэВ и 7.10 МэВ.

Если путем временной селекции (блокировки входа временного канала в интервале времен от 0 до 6 мс относительно импульса посылки быстрых нейтронов) исключить возможность регистрации жесткого гамма-излучения радиационного захвата и регистрировать гамма-кванты с энергией более 3 МэВ, то регистрируемое гамма-излучение будет полностью обусловлено активационным эффектом на ядрах  $^{16}\text{O}$ .

Кислородный активационный эффект, регистрируемый детектором гамма-квантов, расположенным на некотором расстоянии от источника нейтронов, зависит от этого расстояния и очень сильно от скорости движения активируемой среды, которая движется по направлению от источника к детектору относительно прибора. Графики зависимости относительного счёта гамма-квантов от расхода жидкости на разных детекторах показаны на рис. 2.

Величина активационного эффекта, регистрируемого каждым зондом в аппаратуре АИНК36-3Ц прямо пропорционально зависит от интегрального потока нейтронов, излучаемых генератором. Для того, чтобы исключить влияние неустойчивости потока нейтронов на измерения активацион

ных эффектов, в качестве параметров интерпретации можно выбрать отношения активационных эффектов, зарегистрированных детекторами  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ :

$$\eta_{1,2} = N(60)/N(30);$$

$$\eta_{2,3} = N(30)/N(-60);$$

$$N_{1,3} = N(60)/N(-60).$$

Эти параметры также очень чувствительны к скорости движения воды в колонне нефтяной скважины. Так, если прибор расположен на стенке колонны с внутренним диаметром 127 мм (5"), то динамический диапазон  $\eta_{1,2}$  в интервале расходов воды от 5 до 60 м<sup>3</sup>/сут. составляет ~ 6. В том случае, если регистрируемый активационный эффект на обоих зондах обусловлен, в основном, движущимся кислородом, существует аналитическая связь между параметром  $\eta_{1,2}$  и расходом  $Q$ :

$$\eta_{1,2} = \varepsilon(60)/\varepsilon(30) \exp - a/Q \quad (4)$$

или

$$\ln \eta_{1,2} = - a/Q + \ln \varepsilon(60)/\varepsilon(30) \quad (5)$$

где  $\varepsilon(60)$  и  $\varepsilon(30)$  - эффективности детекторов зондов 60 и 30 см, соответственно,

$a = \lambda \times \Delta Z \times S$ ,  $\lambda$  - постоянная распада <sup>16</sup>N, равная 0,1 с<sup>-1</sup>,

$\Delta Z$  - расстояние между детекторами, равное 30 см,

$S$  - сечение, через которое происходит движение жидкости.

Зависимость  $\ln \eta_{1,2}$  (1/Q) хорошо приближается линейной, т.е.  $\ln \eta = a/Q + b$ , при расходах более 12 м<sup>3</sup>/сут, причем параметр  $a$  для данного диаметра колонны 5" составляет 30,15 м<sup>3</sup>/сут. и является постоянным для аппаратуры, тогда как параметр  $b$  зависит, в основном, от установки энергетических порогов дискриминации.

Рассмотренная выше "равновесная" модификация кислородного нейтронно-активационного метода КНАМ может быть реализована как при каротаже со скоростью движения каротажного зонда 30÷120 м/час, так и при измерениях на точках. Эта модификация имеет чувствительность к расходу воды в колонне (5") - 3 м<sup>3</sup>/сутки и к расходу за колонной - 0.7 м<sup>3</sup>/сутки. Недостатки этой модификации КНАМ:

- небольшая верхняя граница измерений расхода, составляющая 70 м<sup>3</sup>/сутки;

- искаженные оценки при наличии встречных потоков (например, поток вниз в колонне нагнетательной скважины и заколонный переток вверх).

В АПК АИНК36-3Ц реализована также "импульсная" модификация кислородного нейтронно-активационного метода КНАМ. Эта модификация реализуется при измерениях на точках и свободна от недостатков, которыми обладает "равновесная" методика КНАМ.

В частности, "импульсная" модификация КНАМ обеспечивает не только выявление встречных потоков, но и оценку их интенсивностей.

Такие возможности демонстрируются на рисунках 3 и 4. На рис. 3 представлен случай измерения в нагнетательной скважине, когда в интервале исследований имеются два встречных потока воды: нисходящий поток в колонне и восходящий поток в заколонном пространстве в зоне некачественного цементного кольца.

Средняя скорость ( $V_1$ ) и расход нисходящего потока ( $Q = V_1 \times S_k$ ) оцениваются по времени прихода максимума активационной метки, регистрируемой детектором  $D_3$  ( $T_3$ ). Средняя скорость заколонного перетока определяется по времени переноса активационной метки ( $\Delta T$ ) от детектора  $D_2$  к детектору  $D_1$ .

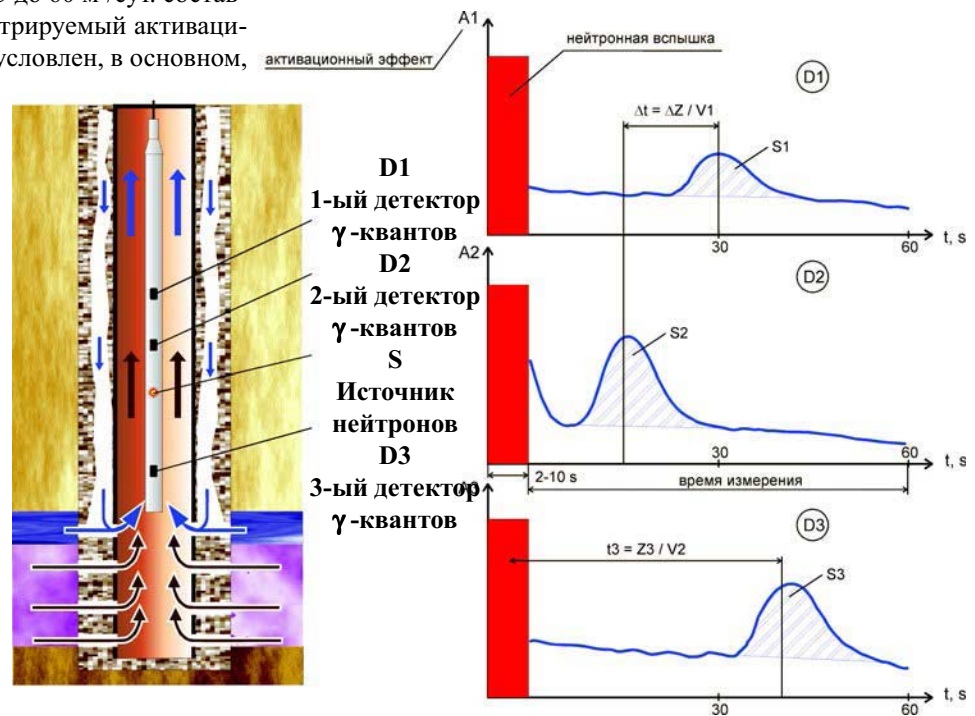


Рис. 4. Измерение встречных потоков методом КНАМ в добывающей скважине.

Сечение  $S_n$ , по которому происходит заколонное движение воды, оценивается по интегралам интенсивностей активационных меток  $S_1$  и  $S_2$ , т.е.  $S_n = f_n(S_1, S_2)$ . Вид функции  $f_1$  определяется по результатам эмпирической настройки на физических моделях.

Возможен случай измерений в добывающей нефтяной скважине, когда в интервале исследований имеются 2 встречных потока: восходящий водонефтяной поток в колонне и нисходящий поток воды в заколонном пространстве. Средняя скорость движения водной фазы в колонне определяется по времени переноса активационной метки ( $\Delta T$ ) от детектора  $D_2$  к детектору  $D_1$ . Доля воды в водонефтяной смеси  $K_w$  определяется как функция интегралов интенсивностей активационных меток  $S_1$  и  $S_2$ ,  $K_w = f_2(S_1, S_2)$ . Вид функции  $f_2$  устанавливается либо по результатам математического моделирования, либо по результатам эмпирической настройки на физических моделях.

Разработанный комплекс АПК АИНК36-3Ц (аппаратура импульсного нейтронного каротажа с каротажным зондом диаметром 36 мм, содержащим три детектора  $\gamma$ -излучения) в настоящее время проходит промышленное опробование на месторождениях нефти Республики Татарстан.