

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 (γ -квантов) и нейтронно-активационный каротаж γ -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 γ -квантов радиационного захвата тепловых нейтронов.

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

- Σ – 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, Σ – 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.

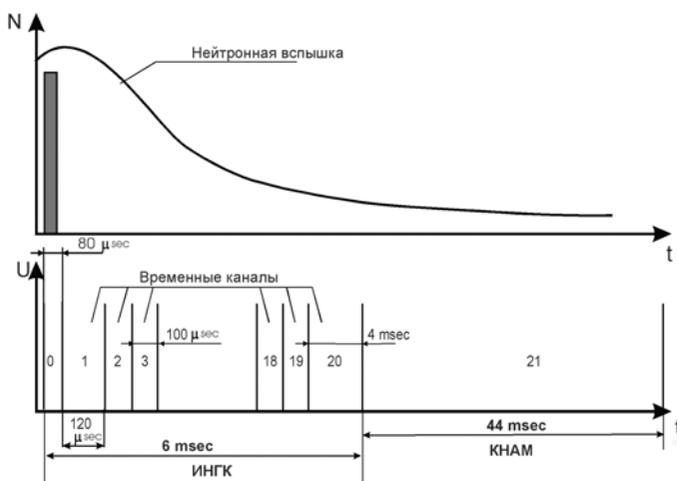


Рис. 1. Режимы измерения аппаратуры АИНК36-3Ц.

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 γ -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, добывается 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 γ -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 τ 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 τ . 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 τ и, соответственно, связанных с ним петрофизических параметров пласта-коллектора.

Затем по известным алгоритмам определяют общую пористость и нефтенасыщенность.

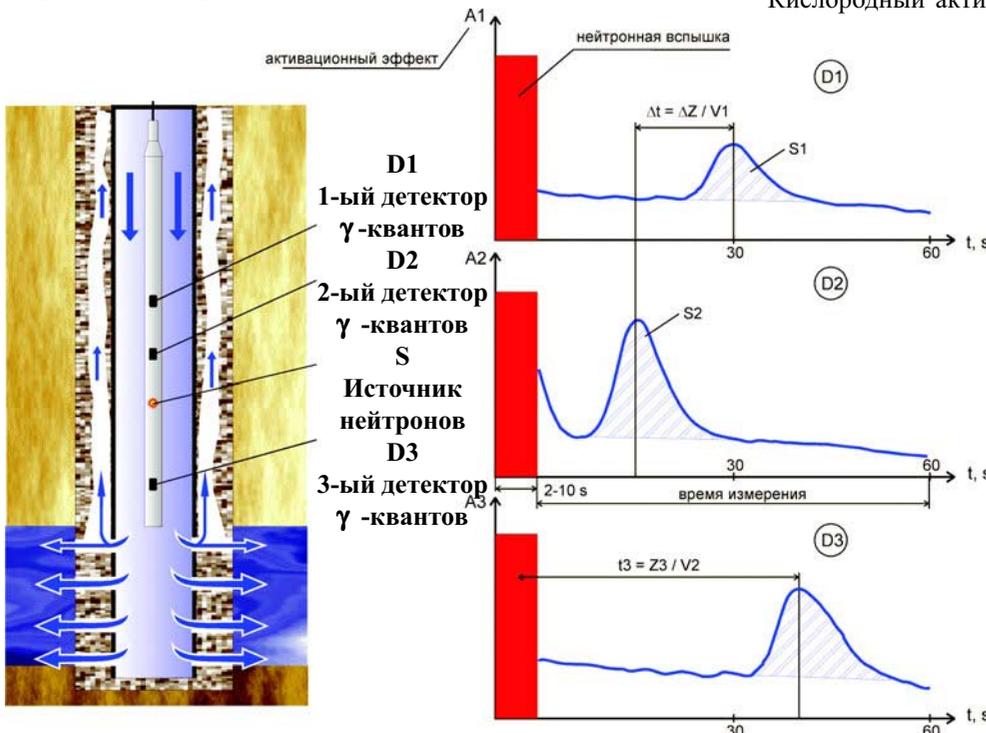


Рис. 3. Измерение встречных потоков методом КНАМ в нагнетательной скважине.

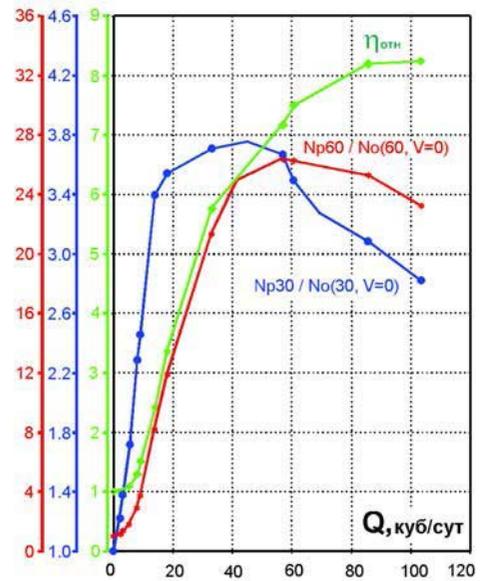


Рис. 2. Графики зависимости счёта гамма-квантов от расхода жидкости.

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}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}N равен 7.35 сек. В результате бета-распада ядер азота ^{16}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}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 м³/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,

$a = \lambda \times \Delta Z \times S$, λ - постоянная распада ¹⁶N, равная 0,1 с⁻¹,

ΔZ - 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 м³/сут, причем параметр a для данного диаметра колонны 5" составляет 30,15 м³/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 м³/сутки и к расходу за колонной - 0.7 м³/сутки. Недостатки этой модификации КНАМ:

- небольшая верхняя граница измерений расхода, составляющая 70 м³/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 (ΔT) от детектора D_2 к детектору D_1 .

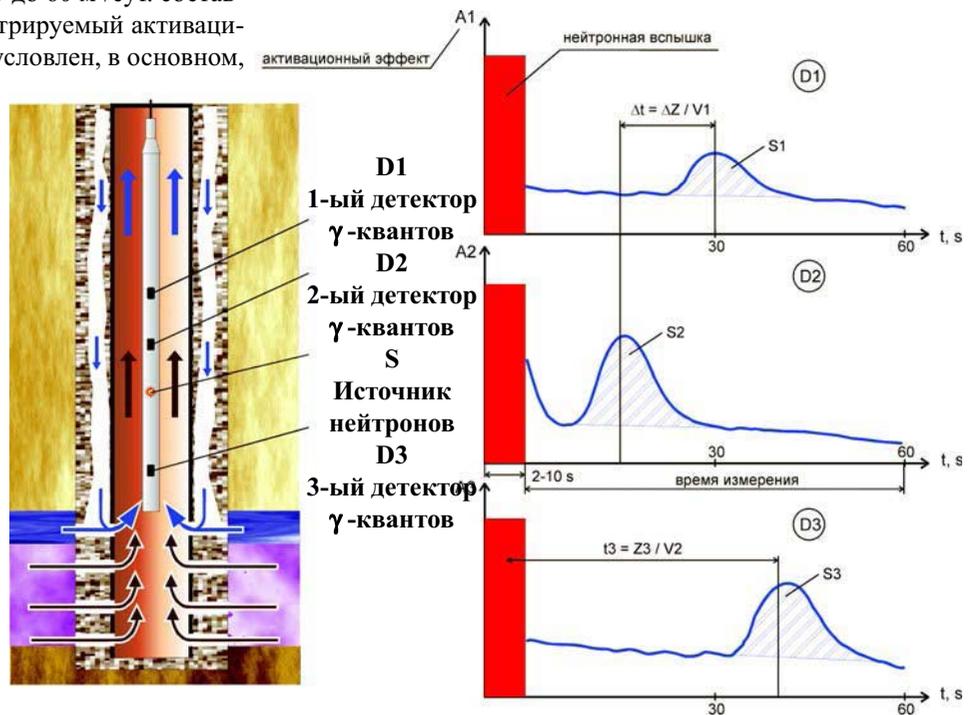


Рис. 4. Измерение встречных потоков методом КНАМ в добывающей скважине.

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 (ΔT) 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 γ -излучения) в настоящее время проходит промышленное опробование на месторождениях нефти Республики Татарстан.