

Каротаж без химических источников нейтронов – шаг сделан.

Авторы: Бортасевич В.С., Емельянов А.В., Черменский В.Г. (Все ООО «НПП Энергия»).

На современном этапе для большинства нефтяных скважин России достаточно полный комплекс ГИС в процессе бурения экономически не выгоден – каротаж обычно выполняется зарубежными компаниями по высоким расценкам. Поэтому непосредственно в процессе бурения наряду с технологической информацией нефтяные компании получают, в большинстве случаев, только данные инклинометрии и ГК (для привязки). Литологическое расчленение, пористость, проницаемость коллекторов, определение насыщенности и т.д. проводят с помощью данных, полученных при каротаже. Как правило, траектории современных эксплуатационных скважин имеют горизонтальные или субгоризонтальные участки. Доставка геофизических приборов в интервал исследования проводится на буровом инструменте, сами скважинные приборы работают автономно. Традиционно комплекс ГИС содержит модули радиоактивного каротажа (ГК, НК в модификации НКт или НКГ, ГК-П), модуль электрического каротажа (индукционный или боковой), инклинометр, профилемер, модуль акустического каротажа. Наиболее «слабым» звеном в данном комплексе являются радиоактивные модули – относительно невысокая статистика измерений нейтронного каротажа является основным ограничением скорости проведения записи. Зачастую, для поддержания низкой скорости подъема бурового инструмента буровой бригаде приходится работать на пониженных приводах, что чревато прихватами бурового инструмента и созданием аварийных ситуаций. Наличие двух радиоактивных источников (Pu-Be и Cs-137) в случае аварии создает опаснейшую ситуацию – создание радиоактивного захоронения.

Для решения данной проблемы компания ООО «НПП ЭНЕРГИЯ» представляет аппаратно-методический комплекс приборов для проведения каротажа на буровом инструменте АПИЛК+АПГГК-90РИ. Модуль АПИЛК – модуль импульсного нейтрон-нейтронного каротажа с высокочастотным импульсным генератором нейтронов МФНГ-601 (разработка и изготовление ООО «НПП Энергия» совместно с ФГУП «Комбинат «Электрохимприбор»). Модуль АПГГК-90РИ – модуль плотностного гамма-гамма каротажа (возможна модификация литолого-плотностного гамма-гамма каротажа). Основные преимущества данного комплекса – **отсутствие химического источника нейтронов, наличие импульсного режима работы нейтронного генератора, извлекаемый источник гамма-квантов из прибора АПГГК-90РИ** (при этом зарядка источника производится стандартным образом после всей сборки приборов на устье сбоку).

Основные моменты, отличающие представляемый комплекс:

1. Если рассматривать данный комплекс только как замена химического источника нейтронов, то даже в этом случае, невозможно не заметить главный плюс – возможность проведения работ с интегральным выходом нейтронов до 10^8 н/сек. Это в 10 раз больше, чем стандартный источник Pu-Be. Соответственно, при прочих равных условиях возможно 10-кратное увеличение скорости каротажа без потери статистики измерений.
2. Современные технологии проведения импульсного нейтронного каротажа (ИНК-Л) позволяют определять основные параметры ФЕС коллектора, в т.ч. его эффективную пористость. На сегодняшний день существуют многократно опробованные алгоритмы, убедительно это доказывающие. Технология ИНК-Л получила положительное заключение после детального рассмотрения в Российской Академии Наук. Анализ проводился как по результатам сравнительных каротажей, где в качестве опорного брались данные ядерно-магнитного каротажа, так и на основе сопоставления данных ИНК-Л по скважинам с керном. Теоретическая и методическая составляющая не являются темой данной

статьи, но данная технология после рассмотрения в ведущих корпоративных институтах начала широко внедряться в Западной Сибири – например, начиная с апреля 2014г. на месторождениях ОАО «Газпромнефть» данный вид исследований выполняется постоянно.

3. Метод ИНК-Л позволяет получать синтетическую кривую плотности горных пород. Алгоритмы расчёта плотности по ИНК-Л на сегодня еще не полностью обеспечены метрологически, в связи с этим требуется наличие опорных интервалов для количественной привязки к разрезу. Аналогичные работы, проводимые, например, в Schlumberger, публикуются без приведения основных зависимостей. Констатируется только факт – с помощью генератора нейтронов возможно получать все необходимые фильтрационно-емкостные свойства коллектора. При этом наличие в рассматриваемом комплексе метода ГГК-П позволяет получить требуемые опорные точки. Однако сам по себе метод ГГК-П при его использовании требует относительно невысоких скоростей исследования: 200-400м/час при использовании источника гамма-квантов активностью до 3×10^{10} Бк. В то же время высокий выход нейтронного генератора, по сравнению с химическим источником, позволяет проводить измерения в скважине на скоростях до 1000м/час. Предлагаемая нами технология основана на получении основных параметров ФЕС коллектора по данным прибора ИНК-Л. Каротаж следует проводить на скоростях порядка 600-800м/час при выходе нейтронов генератора не ниже 7×10^7 н/сек (это в семь раз больший выход химического Pu-Be источника нейтронов, применяемого при каротаже в России). При этом полученные кривые синтезированного плотностного каротажа привязываются на опорные точки. Ввиду того, что при любой скорости подъема бурового инструмента существуют стоянки порядка 1 минуты, обусловленные свинчиванием буровых труб, статистика измерений, полученная на этих стоянках, обеспечивает предельное минимальное значение погрешности метода. В нашем примере привязка полученных синтетических данных по методу ИНК-Л на опорные точки будет осуществляться по данным метода ГГК-П, полученных с великолепной статистикой во время стоянок приборов.
4. Бытующий миф о дороговизне применения импульсных нейтронных генераторов несостоятелен. При современной цене на генератор типа МФНГ-601 порядка 1250 тыс. рублей и его гарантийной работе не менее 250 часов временные затраты работы генератора на интервале каротажа составляют порядка 5-6 часов. В пересчете на амортизационные отчисления это составит 25-30 тыс. рублей на каротаж. Сумма несоизмеримо мала по сравнению со стоимостью всего комплекса, выполняемого на скоростях подъема бурового инструмента порядка 100м/час. При этом проведение каротажа на повышенных скоростях 400-800м/час, существенно снижает аварийность и общее время выполнения работ на скважине. В данной статье мы не проводим экономического анализа, но очевидно, что если принять во внимание затраты на хранение/транспортировку химических источников, вопрос об удорожании работ при использовании нейтронных генераторов становится неактуальным.
5. Как показала практика, надежность генератора типа МФНГ-601 не уступает надежности других элементов, используемых в геофизическом приборостроении. **Скважинные приборы типа АПИЛК с начала 2014 года активно**

эксплуатируются в ОАО «Нижневартовскнефтегеофизика». На сегодняшний день (середина июня 2014г) два скважинных прибора отработали более чем по 60 скважин каждый, при этом зафиксирован 1 отказ (во время отказа акселерометры прибора АПИЛК зафиксировали существенные ударные нагрузки). Работы выполняются на месторождениях: Самотлорское, Покачевское, Тайлаковское, Вахское, Мегионское, Ватинское, Аганское, Дулисьминское, Западно-Асомкинское, Северо-Островное, Ново-Покурское, Крапивинское. С апреля 2014г. два комплекса АПИЛК активно эксплуатируются в ООО НПФ «АМК ГОРИЗОНТ». Выполнено 23 скважинных исследования, 1 отказ (при замене аккумуляторов на литиевые батареи не был сменен алгоритм запуска прибора). Работы выполняются на месторождениях: Вынгайхинское, Крайнее, Вынгапуровское, Филатовское, Шапшинское и др. Ни один из генераторов МФНГ-601, находящихся в эксплуатации, на момент написания статьи не выработал свой ресурс. На наш взгляд, такой надежности может позавидовать «стандартная» аппаратура, не использующая генераторы нейтронов.

Ниже, в таблицах 1 и 2 приведены основные технические характеристики скважинных приборов АПИЛК и АПГГК-90РИ.

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АПИЛК-90

Диапазон измерения сечения захвата тепловых нейтронов	3÷55 с.у. ±1.0%
Диапазон измерения водородосодержания	1÷40 %
Относительная погрешность измерений, %	4.2+2.3(40/ K _П -1)
Общая длина прибора, мм	4540
Диаметр прибора, мм	90
Общая масса прибора, кг	108
Питание, автономное, В	18÷36
Максимальная температура окружающей среды, °С	120
Максимальное гидростатическое давление, МПа	80
Максимальный диаметр скважины, мм	до 350
Скорость каротажа, м/ч	до 1000
Время работы в автономном режиме, часов в режиме записи, в диапазоне	0÷24
Частота генерации нейтронов, Гц	400÷1000
Количество временных каналов, на каждый детектор	100
Размещение	на буровом инструменте

**ОСНОВНЫЕ ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
АПГГК-90РИ**

Диапазон измерения объемной плотности горных пород	от 1.7 до 3.0 г/см ³
Пределы допускаемой основной относительной погрешности, вносимой прибором при измерении объемной плотности горных пород в диапазоне: - от 1.7×10 ³ до 2.0×10 ³ кг/м ³ - от 2.0×10 ³ до 3.0×10 ³ кг/м ³	±2.0% ±1.2%
Общая длина прибора, мм	2400
Диаметр прибора, мм	90
Общая масса прибора, кг	94
Питание, автономное, В	18÷36
Максимальная температура окружающей среды, °С	120
Максимальное гидростатическое давление, МПа	80
Максимальный диаметр скважины, мм	до 350
Минимальный диаметр скважины, мм	102
Скорость каротажа, м/ч	до 400
Время записи в автономном режиме, час*	0÷24
Источник гамма-квантов Cs-137 активностью, не более, Бк	3×10 ¹⁰
Размещение	на буровом инструменте

* - в зависимости от типа применяемого источника питания.

Прототипом создания модуля АПГГК-90РИ послужил автономный прибор ГГК с неизвлекаемым источником гамма-излучения АПГГК-90Р (разработка ООО «НПП ЭНЕРГИЯ»). Тщательная проработка конструкции зонда прибора АПГГК-90Р позволила получить величину условной единицы (скорости счета по малому и большому зондам на модели АД0 (плотность 2.59г/см³)) значительно превышающую этот параметр у аналогичных приборов данного типа. Введение конструктивных решений, обеспечивающих извлечение источника, привело к снижению счетных характеристик, однако, даже в данной модификации значение условной единицы по малому и большому зондам прибора АПГГК-90РИ превосходит аналогичные параметры лучших российских приборов.

Следующая важная отличительная особенность конструкции приборов АПИЛК-90 и АПГГК-90РИ заключается в том, что они представляют собой цилиндрические трубы без утолщений и скосов диаметром 90мм. Данное требование было поставлено инженерами, занимающимся эксплуатацией месторождений, для возможности проведения ГИС в скважинах, пробуренных диаметром 102мм. Традиционно плотностные приборы для работы на кабеле разрабатывались для скважин, пробуренных диаметром 196мм и более. Соответственно, в зондовой части приборы имели на прижимной части проставки, приближающие радиус прибора к радиусу скважины. Для современных приборов, диапазон работы которых находится в существенно более широких рамках, такая конструкция зонда неприемлива. Например, радиус прижимной части зонда типа СГП2-АГАТ (разработка 80-х годов, СССР), составляет 100мм. При работе таким зондом в скважинах диаметром

122÷156мм зазор между центральной частью зонда и стенкой скважины будет играть роль искусственной желобообразности и кавернозности. Таким образом, требование к работоспособности аппаратуры как в малом диаметре, так и в большом, потребовала полного пересмотра конструкции зонда и всего прибора. Разработанный в соответствии с вышеперечисленными принципами зонд обеспечивает получение плотности пересекаемых горных пород с точностью, не хуже 0.03г/см^3 в диапазоне диаметров исследуемых скважин от 102мм до 350мм.

В таблице 1 приведены сводные данные, позволяющие построить основную зависимость прибора АПГК-90РИ и оценить изменение регистрируемой плотности на моделях 4л в г.Раменское при повороте прибора относительно продольной оси на $\pm 15^\circ$.

Таблица 1

Модель, геометрия	Положение прибора	Плотность модели (г/см ³)	Расчетная плотность (г/см ³)
Мрамор, 4л	Прижат	2,71	2,71
Мрамор, 4л	Поворот на +15°	2,71	2,73
Мрамор, 4л	Прижат	2,71	2,71
Мрамор, 4л	Поворот на -15°	2,71	2,69
Мрамор, 4л	Прижат	2,71	2,71
Al B93, 4л	Прижат	2,72	2,74
SiO ₂ сухой, 4л	Прижат	1,62	1,64
CaCO ₃ крошка SiO ₂ мука, 4л	Прижат	2,2	2,22
CaCO ₃ крошка CaCO ₃ мука, 4л	Прижат	2,2	2,22
CaCO ₃ крошка SiO ₂ мука, 4л	Прижат	2,41	2,42
SiO ₂ крошка SiO ₂ мука, 4л	Прижат	2,15	2,17
SiO ₂ крошка CaCO ₃ мука, 4л	Прижат	2,15	2,17
SiO ₂ мука, 4л	Прижат	2,02	2,04
Мрамор с зазором 8мм, 4л	Прижат	2,71	2,73
SiO ₂ крошка с зазором 8мм, 4л	Прижат	1,62	1,64

Как видно из таблицы, изменения направления коллиматоров относительно перпендикуляра к образующей диаметра скважины в диапазоне $\pm 15^\circ$, не приводят к существенному изменению результатов измерений.

Аналогичные работы были проведены в метрологических центрах НПФ «АМК ГОРИЗОНТ» (таблица 2) и ОАО НПП «ВНИИГИС» г.Октябрьский (таблица 3).

Диапазон измеренных моделей в метрологическом центре НПФ «АМК Горизонт»
(4л геометрия):

Таблица 2

Модель	Диаметр, (мм)	Плотность, (г/см³)
Мрамор	124	2.698
Мрамор	156	2.698
Мрамор	216	2.698
Алюминий	156	2.520
Двухфракционная модель	124	2.399
Двухфракционная модель	156	2.399
Двухфракционная модель	216	2.399
Однафракционная модель	124	2.087
Однафракционная модель	156	2.087
Однафракционная модель	216	2.087
Вода	-	1.000

Диапазон измеренных моделей в метрологическом центре ОАО НПП «ВНИИГИС»
(2л геометрия):

Таблица 3

Модель	Плотность (г/см³)	Примечание
Титан МА-2+Магний ВТ1-0	2.93	На данных моделях проводились измерения с имитацией глинистых корочек толщиной 6, 10 и 20мм.
Алюминий АД0	2.58	
Алюминий В-95	2.85	
Мрамор	2.71	
Магний МА2+Алюминий АД0	2.289	
Магний МА-14	1.831	

На рисунке 1 показаны результаты обработки измерений на моделях ОАО НПП «ВНИИГИС» и НПФ «АМК Горизонт».



Рис. 1. Результаты работ аппаратурой АПГГК-90Р на моделях 4л, полупластах, с имитаторами глинистых корочек.

В левой колонке красным цветом показаны истинные плотности моделей, (заштриховка цветом волны). В зависимости от условий измерения (4л геометрия, наличие глинистой корочки и т.д.) синим цветом показаны измеренные значения прибором АПГГК-90РИ. В диапазоне изменения диаметра скважины от 124мм до 200мм, при наличии глинистых корочек от 6мм до 20мм, показания прибора АПГГК-90РИ укладываются в заданные с точностью не хуже $0,03\text{г/см}^3$.

Пострелная на данных моделях зависимость была применена при скажинных испытаниях, проведенных в апреле 2014г. на одном из месторождений Западной Сибири, где прошли проверку скважинные приборы ведущих производителей России. На рисунке 3 приведен пример записи прибора АПГГК-90РИ, показывающий хорошую сходимость при

спуске и подъеме прибора. На том же планшете приведен пример сравнения с записью «стандартным» прибором (ГГК-авт). На наш взгляд, различия между кривыми, полученными различными приборами, обусловлены существенно большим влиянием каверности на показания «стандартного» прибора вследствие реализации прижима измерительного зонда. Показательно, что АПГГК-90РИ среди аналогичных прижимных приборов, доставляемых в интервал исследования на буровых трубах, имеет развязанную шарнирами длину порядка 2м. По данным авторов, ближайшие аналоги имеют существенно большую длину жесткой, прижимной части.

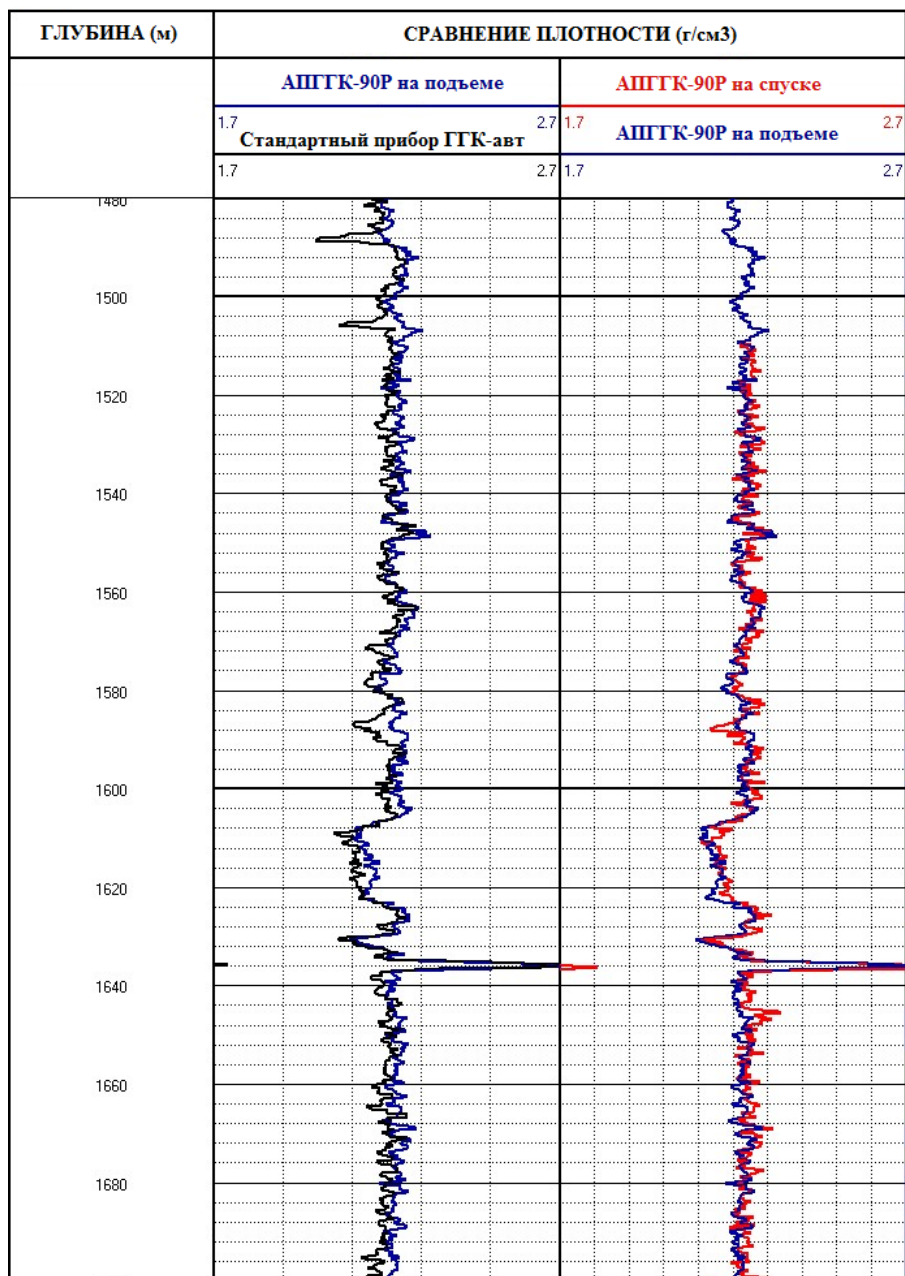


Рис. 2. Пример скважинных испытаний.

Т.к. прибор АПГГК-90РИ разрабатывался специально для совместной работы с аппаратурой импульсного нейтронного каротажа типа АПИЛК, в его конструкции предусмотрено извлечение источника гамма-излучения в случае аварийной ситуации. Примечательно, что извлечение источника происходит по каналу вдоль оси бурового инструмента, в то время, как зарядка источника осуществляется традиционным способом сбоку, после сборки всей конструкции на устье скважины. Это выгодно отличает данный

прибор от существующих аналогов, где источники либо не извлекаются, либо вставляются так же по оси прибора до начала сборки на устье скважины. При этом происходит облучение обслуживающего персонала в процессе сборки связки, так как сборка связки происходит с установленным источником.

На рисунках 3а и 3б приведены фотографии головки свободного вращения, входящей в комплектацию прибора АПГГК-90РИ и имеющей внутренний канал для извлечения источника в случае аварии.

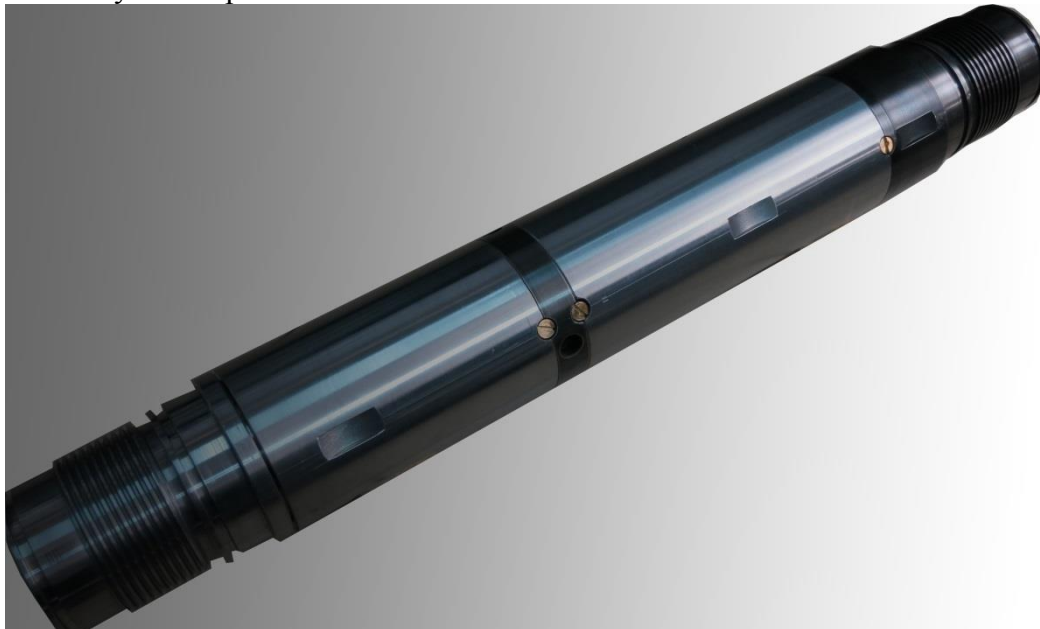


Рис. 3а. Головка свободного вращения.



Рис. 3б. Канал для извлечения источника в головке свободного вращения.

Прибор АПИЛК-90 так же прошел метрологические испытания на моделях ООО «Газпром Георесурс» в г.Раменское, ОАО НПП «ВНИИГИС» и НПФ «АМК ГОРИЗОНТ» (г.Октябрьский). Более высокий выход нейтронов (на некоторых скважинах при проведении исследований выход поднимали до 10-ти кратного увеличения по сравнению со стандартным химическим Pu-Be источником ИБН-8-5) позволяет получать более качественные скважинные материалы относительно традиционных приборов. На рисунке 4 показан пример записи, проведенной в испытательной скважине в целях опробования возможностей скважинных приборов различных производителей.

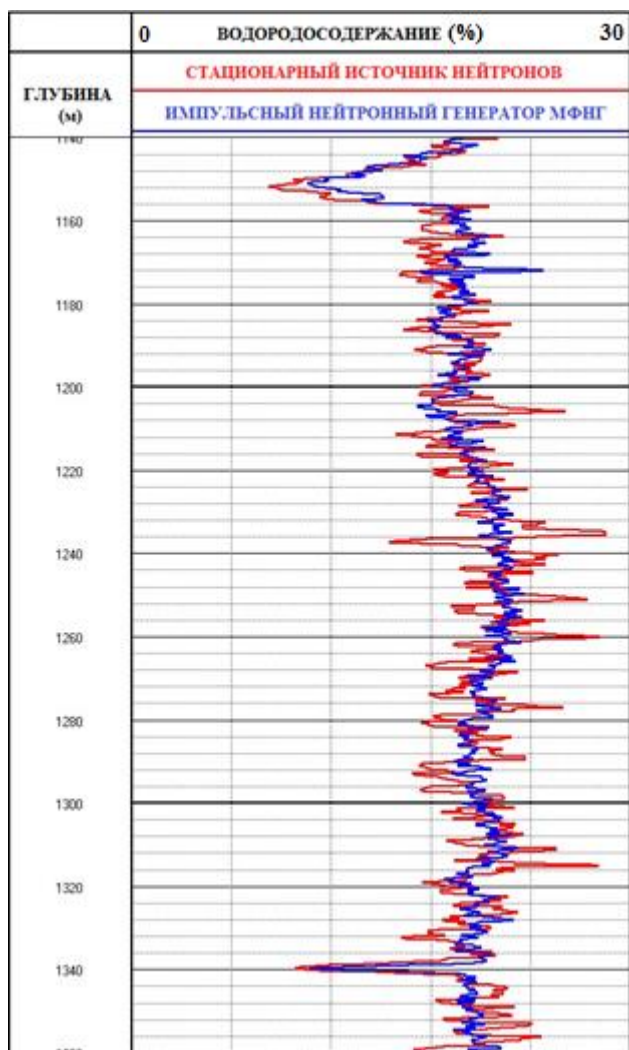


Рис. 4 Сравнение качества получения водородосодержания традиционным прибором и АПИЛК-90.

При всем том, что связь между качеством получаемых данных нейтронного каротажа и выходом нейтронного источника хорошо известна, данной диаграммой на рисунке 4 мы хотим только подчеркнуть тот факт, что **на сегодняшний день реально появилась аппаратура нейтронного каротажа нового поколения**. Оснащенная безопасным, с точки зрения охраны окружающей среды, нейтронным генератором, способным генерировать потоки нейтронов в 10 раз превышающие выход стандартного источника ИБН-8-5, и гелиевыми детекторами высокого давления (совместная разработка ООО «НПП Энергия» и ФГУП «Комбинат «Электрохимприбор») данная аппаратура не имеет аналогов по статистике измерений. Наличие импульсного режима работы нейтронной трубки позволяет дополнительно регистрировать прибором АПИЛК макросечения поглощения тепловых нейтронов пересекаемых пород, регистрируя нейтроны практически без просчетов: длительность нейтронного импульса $5 \div 500$ мксек, частота генерации нейтронов до 1кГц (возможен также непрерывный режим работы). Это выгодно отличает его от режима работы вакуумных нейтронных генераторов, до 90% нейтронов которых пропадают в областях просчетов. На рисунке 5 показан пример записи в испытательной скважине, проведенный автономным прибором АПИЛК и «стандартным» прибором ИНК с вакуумной нейтронной трубкой.

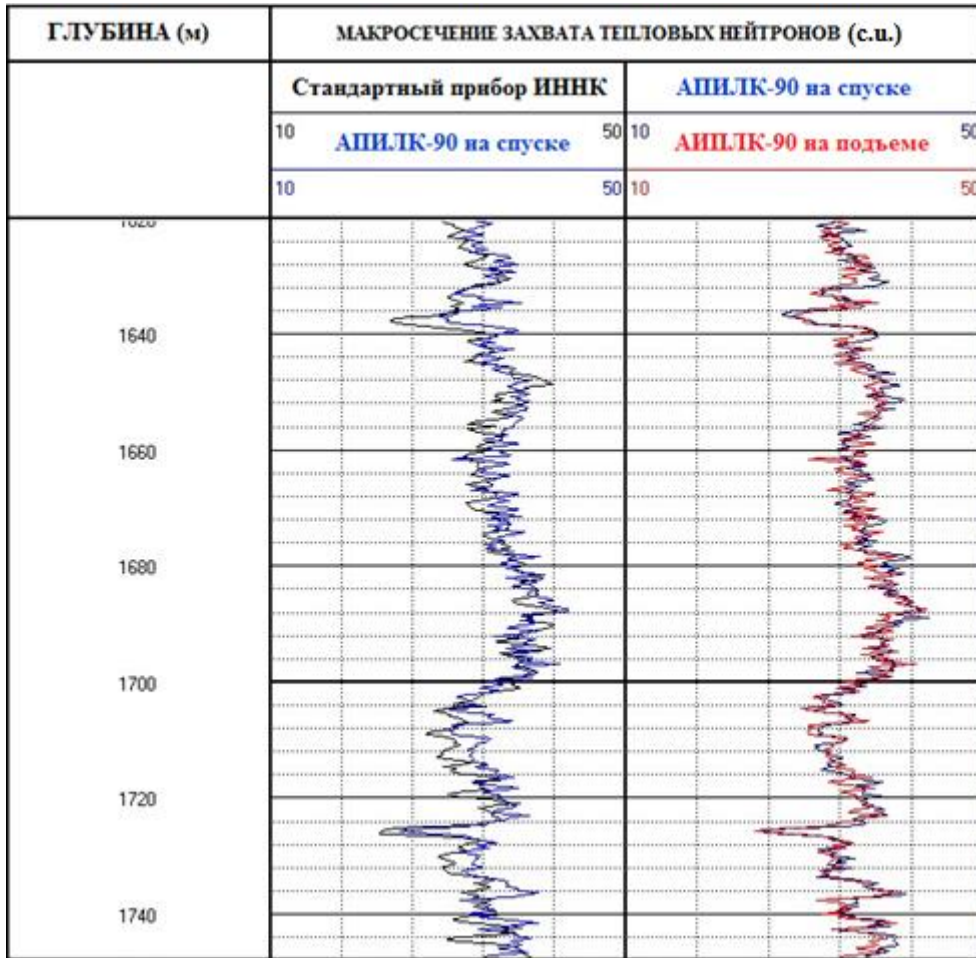


Рис. 5. Сравнение качества получения сечения поглощения «стандартным» прибором ИНК и АПИЛК-90.

Хорошо видно, что сечения, измеренные аппаратурой АПИЛК на спуске и подъеме (скорости, соответственно, 400 м/час и 200 м/час), хорошо повторяют друг друга. Кривая сечения, измеренная «стандартной» аппаратурой ИНК на скорости 100м/час, в ряде мест расходится с совпадающими кривыми АПИЛК, что говорит о более низкой статистической значимости кривой «стандартного» ИНК.

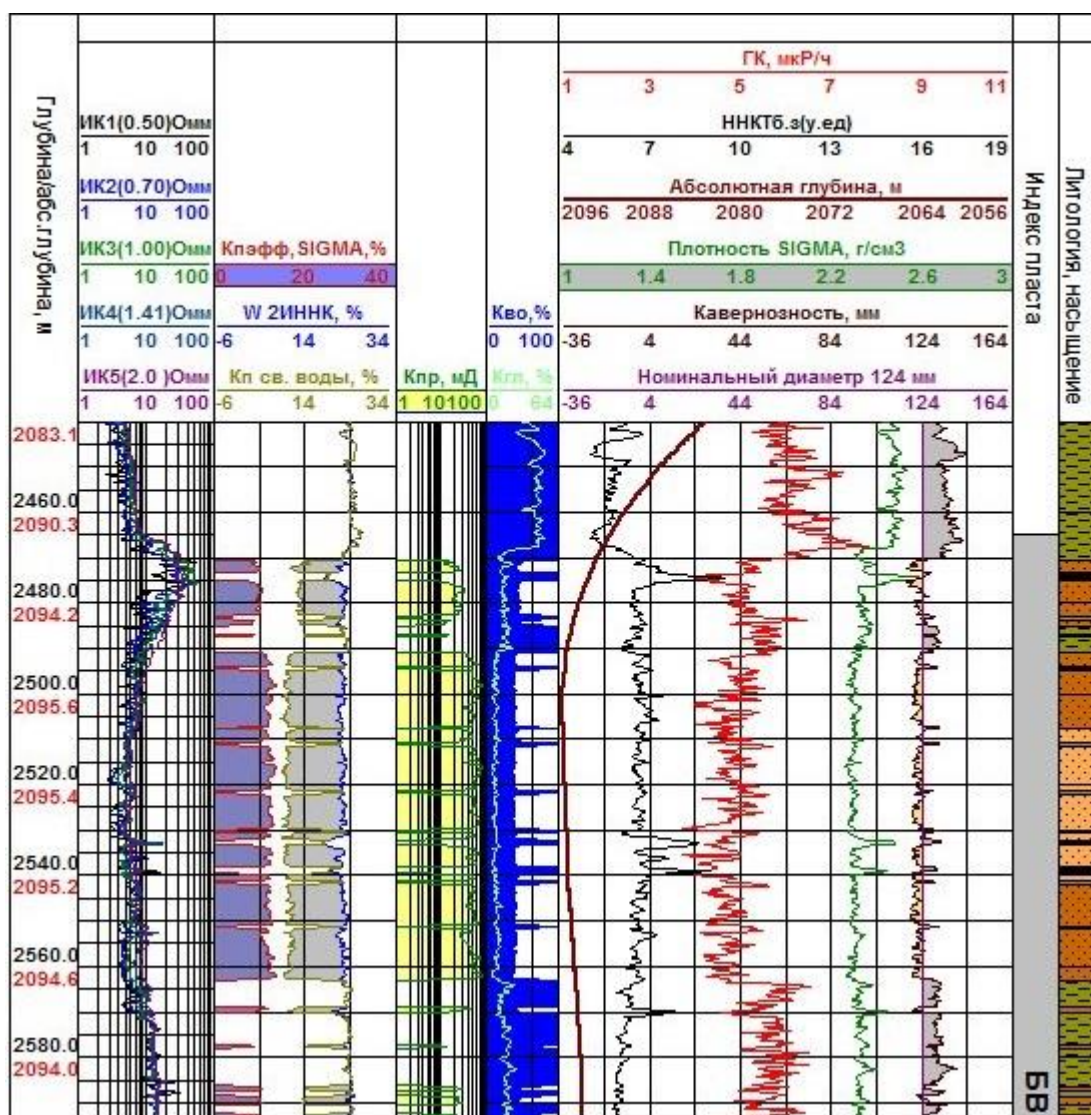


Рис.6 Пример работы комплекса АПИЛК-90 в горизонтальном участке скважины.

Данный комплекс начал активно эксплуатироваться на месторождениях в Западной Сибири. За первые 6 месяцев работы проведено более 140 скважинных исследований, ведутся опытно-методические работы на ряде месторождений. На рисунке 6 приведен один из многочисленных примеров исследования горизонтального участка скважины. Основные преимущества комплекса – радиационная безопасность, высокое качество материала, получение информации о K_p эфф, ранее доступной только при использовании полного комплекса ГИС.

Все метрологические характеристики приборов АПИЛК, АПГГК-90Р, АПГГК-90РИ получены в метрологических центрах ОАО ВНИИГИС, ООО НПФ «АМК ГОРИЗОНТ», ООО «Газпром Георесурс». Авторы выражают всем сотрудникам вышеперечисленных центров признательность. На приборы получены сертификаты соответствия.

В настоящее время в ООО «НПП Энергия» продолжают работы по дальнейшему совершенствованию метрологического и программно-методического обеспечения комплекса.