

Результаты исследований и работ ученых и конструкторов

УДК 550.832

М. И. Агалакова, С. Л. Бутолин, В. Г. Черменский
ООО "НПП Энергия"

В. А. Велижанин
ООО "Нефтегазгеофизика"

В. С. Бортасевич
ООО "Октургеофизика"

К. В. Коротков
ОАО "Нижневартовскнефтегеофизика"

ИМПУЛЬСНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ РАЗРАБОТКИ ООО "НПП ЭНЕРГИЯ" В СКВАЖИННОЙ ГЕОФИЗИКЕ

По материалам конференции "Портативные генераторы
нейтронов и технологии на их основе"
(Москва, ФГУП "ВНИИА", 2012 г.)

Специалисты ООО "НПП Энергия" и ФГУП "Комбинат "Электрхимприбор" разработали и изготавливают для скважинной геофизики высокочастотные импульсные нейтронные газонаполненные трубки. Созданные на их основе импульсные нейтронные генераторы прошли промышленное опробование. Техничко-эксплуатационные характеристики генераторов соответствуют требованиям, предъявляемым к данным изделиям для применения в скважинной нефтегазовой геофизике.

Ключевые слова: каротаж, генераторы нейтронов, трубки, изготовление, опробование, результаты.

Первые исследования, связанные с восстановлением работоспособности импульсных высокочастотных нейтронных генераторов, были начаты в 2008 г. В то время ООО “Октургеофизика” закупило у ФГУП “Комбинат “Электрохимприбор” высокочастотные нейтронные трубки Ж83-Р2044 для их использования в нейтронных генераторах типа ИНГ-061 производства ФГУП “ВНИИАвтоматика”. Это был вынужденный шаг: наработка генераторов ИНГ-061 снизилась относительно заявляемых 200 ч, в процессе работы часто проявлялись неисправности, выражающиеся в высоковольтных пробоях и отключениях генераторов на несколько минут, длительность и форма нейтронного импульса изменялись в недопустимых пределах. Все это негативно сказывалось на качестве геофизического материала. На наш взгляд, предыдущая модель генератора ИНГ-06 имела более высокие технико-эксплуатационные показатели. Применение трубки Ж83-Р2044 сопровождалось заменой блока питания и управления генератора и позволяло на имеющемся “железе” проводить модернизацию, обеспечивающую необходимые эксплуатационные характеристики (генератор МНГЖ-70). В 2009 г. начались работы по нейтронным высокочастотным газонаполненным трубкам и генераторам на их основе. В 2010 г. было зарегистрировано ООО “НПП Энергия”, для которого вышеуказанные работы стали основным видом деятельности. В настоящей статье рассмотрены только импульсные нейтронные генераторы на газонаполненных трубках.

Сегодня для применения в скважинной геофизике разработаны и выпускаются два типа импульсных высокочастотных газонаполненных трубок максимальным диаметром 40 и 28 мм – АРЕВ-40 и АРЕВ-28. Разработка этих устройств опиралась на самые передовые технические и технологические достижения в мире. Составные детали нейтронных трубок и генераторов изготавливаются по документации ООО “НПП Энергия” на предприятиях в шести различных странах. Это Россия, Германия, Италия, Франция, США, Нидерланды. Технология сборки нейтронной трубки разработана совместно со специалистами ФГУП “Комбинат “Электрохимприбор”, там же происходит ее изготовление и насыщение газом. Для унификации изделий и снижения их себестоимости в обоих типах трубки применена единая конструкция ионного источника. Баллоны трубок изготовлены из вакуумной керамики, система ускоряющих и фокуси-

рующих электродов практически не имеет консольных деталей. Все это обеспечило повышенную ударную и вибрационную прочность трубки по сравнению с существующими российскими аналогами. Немалую роль в этом сыграло и то, что трубки серии АРЕВ имеют относительно небольшую длину (рис. 1, 2).

Для нейтронных трубок серии АРЕВ были разработаны блоки формирования высоких напряжений (БФВН) и алгоритмы поддержания стабильности работы (АПСР) на различных частотах генерации нейтронов, нейтронных выходах и температурах окружающей среды. В силу того что оба типа нейтронных трубок имеют одинаковую конструкцию ионного источника, БФВН и АПСР для них принципиально ничем не отличаются.

Блок-схема включения нейтронной трубки приведена на рис. 3.



Рис. 1. Внешний вид трубки АРЕВ-40



Рис. 2. Внешний вид трубки АРЕВ-28

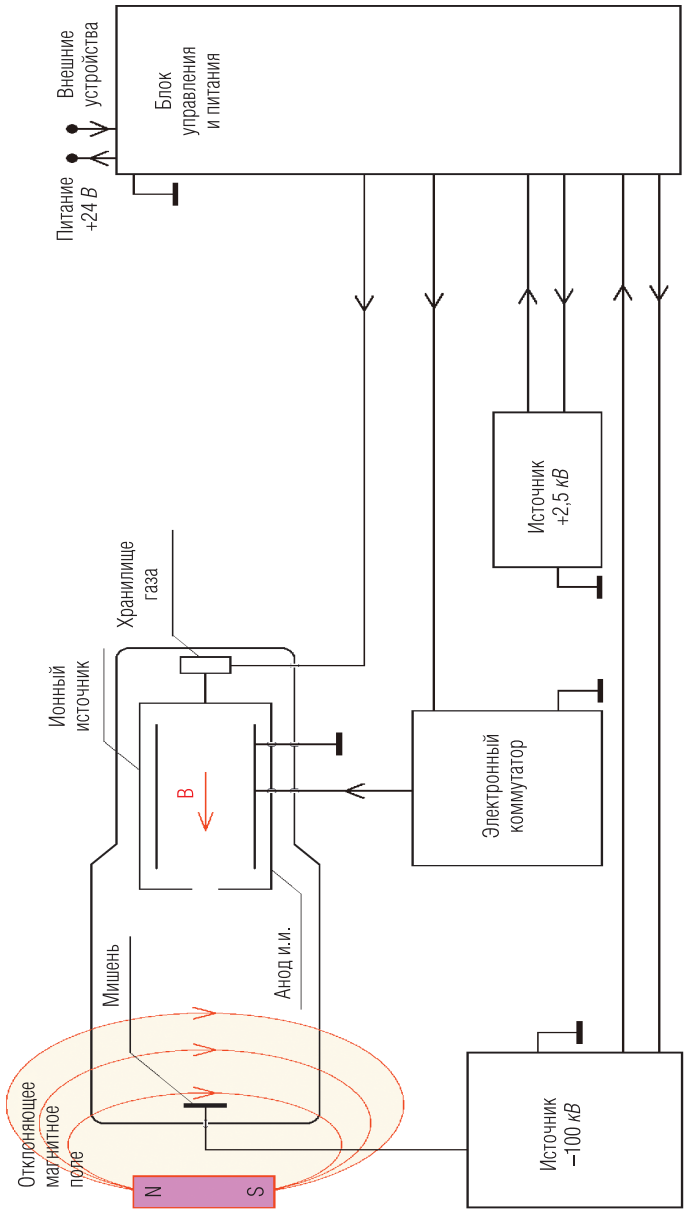


Рис. 3. Блок-схема включения трубки

В целом нейтронные трубки включаются по классической схеме, ноу-хау здесь являются схемотехнические и конструктивные решения отдельных узлов, алгоритмы поддержания рабочих режимов в условиях влияния дестабилизирующих факторов: температуры окружающей среды, внешних магнитных полей (намагниченные участки обсадной колонны и муфт), выработки газа в подземном хранилище газа (ПХГ).

Обычно нейтронный импульс трубки имеет в первом приближении длительность и форму анодного импульса, подаваемого на нейтронную трубку. Формирование анодного импульса напряжением 2 кВ в блоке питания и управления типового стандартного импульсного нейтронного генератора осуществляется на трансформаторе. Понятно, что попытка сформировать на трансформаторе прямоугольный и достаточно широкий анодный импульс приводит к увеличению размеров трансформатора.

Но даже в этом случае насыщение сердечника трансформатора, качество его изготовления, паразитные емкости анода и подходящих к нему проводов не позволяют сформировать нейтронный импульс с крутыми фронтами включения/выключения и достаточной длины. Как следствие, “трапецевидные” и “треугольные” нейтронные импульсы, их высокая скважность, невозможность применения данных схемных решений для скважинной аппаратуры диаметром 50–43 мм. Качество геофизического материала при спектрометрии гамма-излучения неупругого рассеяния нейтронов в таком режиме работы оставляет желать лучшего. В генераторах, работающих на нейтронных трубках серии АРЕВ, применены узлы формирования анодных импульсов без использования трансформаторов. Наличие прецизионных обратных связей и активный режим работы как при включении анодного импульса, так и при его выключении, позволяет формировать практически идеальный прямоугольный импульс с крутизной нарастания/спада фронтов порядка 5 кВ/мкс . Во время подачи на нейтронную трубку анодного импульса происходит прецизионное измерение передаваемой мощности, что наряду с поддержанием давления газа в трубке позволяет измерять параметр, прямо пропорциональный нейтронному выходу. Изменение выхода нейтронов происходит путем изменения высокого ускоряющего напряжения $70\text{--}100\text{ кВ}$, давления газа в трубке и, при необходимости, длительности анодного импульса. Рабочее ускоряющее напряжение трубки серии АРЕВ в режиме нейтронного выхода $1 \cdot 10^8\text{ н/с}$ и частоте генерации нейтронных импульсов 10 кГц при

скважности 5 составляет 85 *кВ*. Общее электропотребление генератора – 14 *Вт*. Генераторы, изготовленные на основе нейтронных трубок типа АРЕВ по вышеописанным принципам, получили коммерческое название МФНГ (многофункциональный нейтронный генератор). На рис. 4 показаны временные спектры, регистрируемые в интегральных каналах аппаратуры углеродно-кислородного каротажа типа АИМС. Форма нейтронной вспышки генератора МФНГ (рис. 4, б) по своим характеристикам выгодно отличается от формы нейтронного импульса, генерируемого схемой с анодным трансформатором (рис. 4, а).

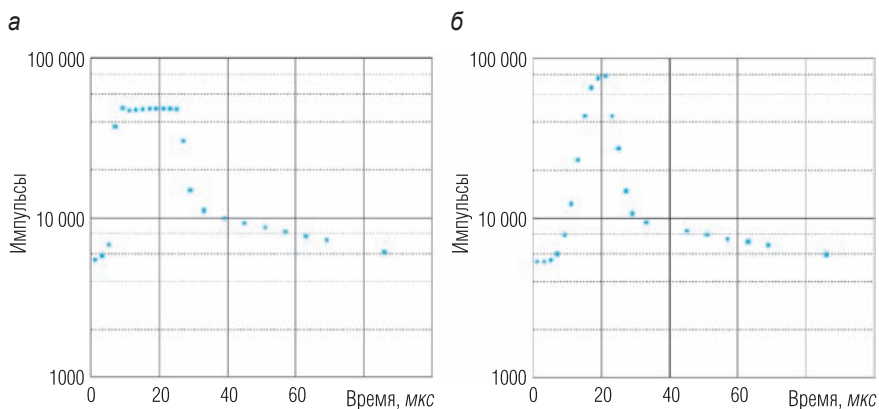


Рис. 4. Временные спектры в интегральных каналах аппаратуры типа АИМС: а – форма нейтронного импульса, генерируемая схемой с анодным трансформатором; б – форма нейтронной вспышки МФНГ

В табл. 1 приведены основные данные по изготавливаемым нейтронным генераторам и их применению. Это достаточно условная таблица, так как все типы генераторов могут работать в широком диапазоне частот и скважностей. Если не брать во внимание надежность и ресурс, такие геологические задачи, как С/О-каротаж и сигма-каротаж (каротаж измерения макроскопического сечения поглощения тепловых нейтронов горных пород) достаточно успешно выполнялись до настоящего времени и с помощью существующих российских импульсных нейтронных генераторов.

Первое было возможно благодаря относительно короткому нейтронному импульсу для С/О-каротажа (10–20 *мкс*), который можно

Таблица 1

Основные характеристики генераторов нейтронов

Название генератора, диаметр, мм	Тип нейтронной трубки	Основной режим работы: частота/скважность	Решаемая геологическая задача	Тип скважинной аппаратуры	Состояние разработки
МФНГ-341, 34	АРЕВ-28	500 Гц/ 400 мкс	Определение ФЕС коллекторов, сигма-каротаж	ПИЛК-42	Опробование
МФНГ-411, 41	АРЕВ-28	500 Гц/ 400 мкс		ПИЛК-MWD	Разработка
МФНГ-601, 60	АРЕВ-40	500 Гц/ 400 мкс		ПИЛК-76, АПРК-ПИЛК	На производстве
МФНГ-701, 70	АРЕВ-40	10 кГц/ 20 мкс	С/О-каротаж	АИМС	На производстве
МИНГ-701, 70	Ж83-Р2044	10 кГц/мкс	С/О-каротаж	АИМС, ИНГКС-95, ЦСП-ИНГКС-90	На производстве

было сформировать на трансформаторе. Для сигма-каротажа форма вспышки, в первом приближении, не играет роли – важны частота (400–1000 Гц) и интегральный выход нейтронов. Для определения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород-коллекторов с помощью импульсного нейтронного генератора требования к последнему существенно повышаются и выпускаемые серийно отечественные импульсные нейтронные генераторы их не обеспечивали.

С точки зрения авторов задача определения ФЕС пластов-коллекторов наиболее актуальна для будущего применения импульсных нейтронных источников, особенно в геофизических системах, работающих в процессе каротажа (MWD).

Рассмотрим основные требования к нейтронным генераторам и примеры опробования данной технологии на нефтяных месторождениях Западной Сибири.

Метод определения ФЕС пластов-коллекторов получил название ИНК-Л (импульсный нейтронный каротаж литологический). Метод базируется на тесной корреляционной связи между количеством связанной воды и количеством сорбированных в коллекторе элементов с аномально высокими сечениями поглощения тепловых нейтронов. В первую очередь это Gd, В. При условии, что водород входит только в состав химически и физически связанной воды и подвижного флюи-

да, можно вычислить эффективную пористость коллектора, измеряя общее водородосодержание породы и макросечение поглощения тепловых нейтронов в ней. Соответственно, импульсный нейтронный генератор должен обеспечить такой режим работы, при котором возможно определять как общее водородосодержание, так и макросечение поглощения тепловых нейтронов. Исследования режимов работы генераторов нейтронов, выполненные рядом ученых как в России, так и за рубежом, позволили получить следующие оптимальные значения (в качестве регистрирующей рассматривается как минимум двухзондовая нейтронная установка): частота генерации нейтронов 400–600 Гц, длительность нейтронного импульса 400–500 мкс, выход нейтронов должен обеспечивать 80–90% от максимально допустимой загрузки регистрирующего тракта во время нейтронного импульса (определяется геометрией регистрирующего зонда скважинного прибора, геологическим разрезом и конструкцией скважины), время между режимами работы нейтронной трубки да/нет на более 1 мкс, неконтролируемое относительное изменение выхода нейтронов во время проведения скважинных исследований не более 7%.

Нейтронные генераторы серии МФНГ полностью укладываются в данный оптимальный режим работы. Диапазон генерируемых частот – до 50 кГц, длительность нейтронного импульса – от 7 мкс до режима непрерывного излучения. Выход нейтронов до $2 \cdot 10^8$ н/с обеспечивает требования по интегральной загрузке измерительного тракта практически всех известных зондов скважинной аппаратуры. В настоящий момент генератор МФНГ-601 (рис. 5) применяется в скважинной аппаратуре ПИЛК-76 для решения задач определения ФЕС пластов-коллекторов.



Рис. 5. Генератор МФНГ-601

Опробование метода ИНК-Л для определения ФЕС пород-коллекторов началось при участии авторов в 2010 г. на нефтяных месторождениях Западной Сибири. На первом этапе общее водородо-

досодержание определялось по данным нейтронного каротажа по тепловым нейтронам со стационарным Pu–Be источником (НКТ), макросечение поглощения в коллекторе определялось по замерам аппаратурой типа АИНК с вакуумным нейтронным генератором типа ИНГ-101, работающим на частоте 20 Гц. Понятно, что запись различными скважинными приборами, не интегрированными в единую связь, вносит дополнительные погрешности расчета эффективной пористости. Однако в то время это был единственно возможный вариант опробования метода. Несовершенство применяемой технологии явилось мощным катализатором разработки нейтронных генераторов серии МФНГ-601.

Было исследовано более 100 скважин, и везде были получены положительные результаты. Для систематизации накопленного опыта и выработки методических инструкций в 2011–2012 гг. данные работы были проведены в скважинах, где был выполнен практически полный комплекс ГИС открытого ствола, включая метод ядерно-магнитного резонанса (ЯМР). К сожалению, кернового материала по скважинам, где проводился ИНК-Л, нет. Однако по другим скважинам месторождений и объектов, по которым проходило опробование метода, имеется сопоставление кернового материала и метода ЯМР, убедительно доказывающее, что метод ЯМР для задач определения эффективной пористости коллекторов и их проницаемости после настройки по керну не уступает последнему по точности определяемых величин. Исходя из этого, все сравнения в скважинах метода ИНК-Л проводились с методом ЯМР (рассматривались только модификации ЯМР “в сильном поле”). На рис. 6 приведен планшет, наглядно демонстрирующий результат проведенных исследований: черная кривая – $k_{п.эф}$ по данным метода ЯМР компании Schlumberger; коричневый цвет – $k_{п.эф}$ по данным метода ИНК-Л. Сиреневый цвет – произведение $k_{п.общ} \times k_{п.}$. (В приближении, что коллектор полностью насыщен нефтью, данный параметр будет соответствовать эффективной пористости.) Причем пласт АС₁₁ водонасыщен, БС₃₋₄ нефтенасыщен. Кривая ПС в нижнем пласте практически не работает. Расхождение на глубине 2300–2302 м обусловлено, на наш взгляд, неточной настройкой метода ЯМР: отсечка дифференциального спектра ЯМР-сигнала релаксации на фиксированном уровне не позволяет учесть изменение структуры порового пространства в данном интервале. Косвенно это подтверждается кривой ПС.

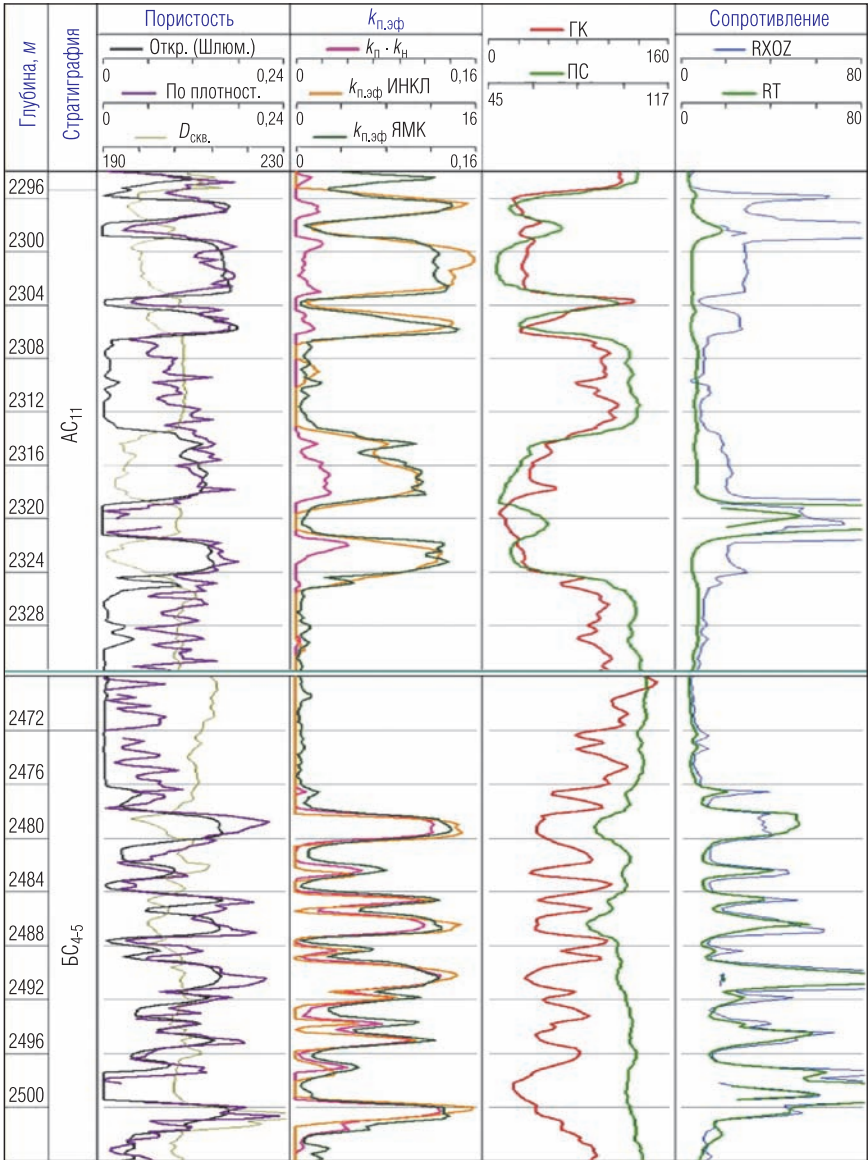


Рис. 6. Сравнение результатов определения $k_{\text{п.эф}}$ и $k_{\text{пр}}$ различными методами

По результатам промышленного испытания метод ИНК-Л начиная с 2013 г. будет введен в комплекс ГИС крупнейших нефтяных компаний России.

В завершение несколько слов о такой важной характеристике нейтронного генератора, как ресурс работы. Все данные по ресурсу приведены по скважинным измерениям в режиме работы, оптимизированном для проведения С/О-каротажа.

Средняя наработка нейтронной трубки Ж83-Р2044 в генераторах МНГЖ-70 в ООО “Октургеофизика” составила 280 ч (данные по 19 нейтронным трубкам). При производственных испытаниях в тресте “Сургутнефтегеофизика” наработка составила 317 ч (испытывался один генератор, испытания продолжаются, в процессе испытаний в генераторе произошел обрыв покупного изделия (дресселя питания напряжением 200 В), дроссель заменен на новый).

Примечательно, что в тресте “Сургутнефтегеофизика” ведется наиболее полный контроль за качеством каротажных данных с соответствующими записями в журнале. К скважинным материалам с нейтронным генераторам МНГЖ-70 претензий в КИП нет. Производственные испытания нейтронных генераторов МНГЖ-70 также проходят в ЗАО ПГО “Тюменьпромгеофизика” (4 генератора) и в ООО “ИНГЕО” (3 генератора). Испытания продолжаются.

Испытания трубки АРЕВ-40 в составе нейтронного генератора МФНГ-701 проводятся в ООО “Октургеофизика”. Опробываются несколько трубок (генераторов) с текущими наработками, доходящими до 700–800 ч. Испытания продолжаются. В процессе опробования некоторые генераторы были возвращены в лабораторию для корректировки алгоритмов работы нейтронной трубки с последующим возвратом на производство. Сегодня с помощью генераторов типа МФНГ исследовано более 1100 скважин.

Нейтронная трубка АРЕВ-28 проходит стендовые испытания в составе нейтронного генератора МФНГ-341.