

# 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 "Электрохимприбор" разработали и изготавливают для скважинной геофизики высокочастотные импульсные нейтронные газонаполненные трубы. Созданные на их основе импульсные нейтронные генераторы прошли промышленное опробование. Технико-эксплуатационные характеристики генераторов соответствуют требованиям, предъявляемым к данным изделиям для применения в скважинной нефтегазовой геофизике.

*Ключевые слова: каротаж, генераторы нейтронов, трубы, изготовление, опробование, результаты.*

Первые исследования, связанные с восстановлением работоспособности импульсных высокочастотных нейтронных генераторов, были начаты в 2008 г. В то время ООО “Октургоефизика” закупило у ФГУП “Комбинат “Электрохимприбор” высокочастотные нейтронные трубы 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, выражавшиеся 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 трубы 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 трубы 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 трубы 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 трубы по сравнению с существующими российскими аналогами. Немалую роль в этом сыграло и то, что трубы серии АРЕВ имеют относительно небольшую длину (рис. 1, 2).

Для нейтронных трубок серии АРЕВ были разработаны блоки формирования высоких напряжений (БФН) 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, БФН и АПСР для них принципиально ничем не отличаются.

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

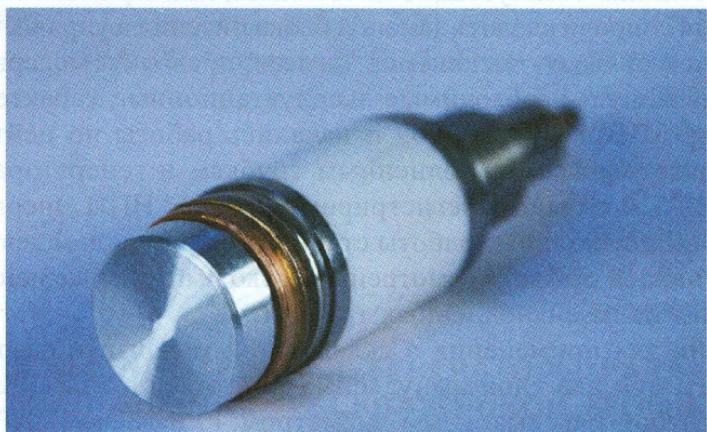


Рис. 1. Внешний вид трубы АРЕВ-40

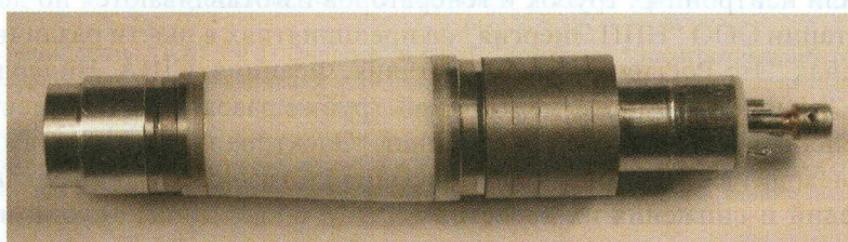


Рис. 2. Внешний вид трубы АРЕВ-28

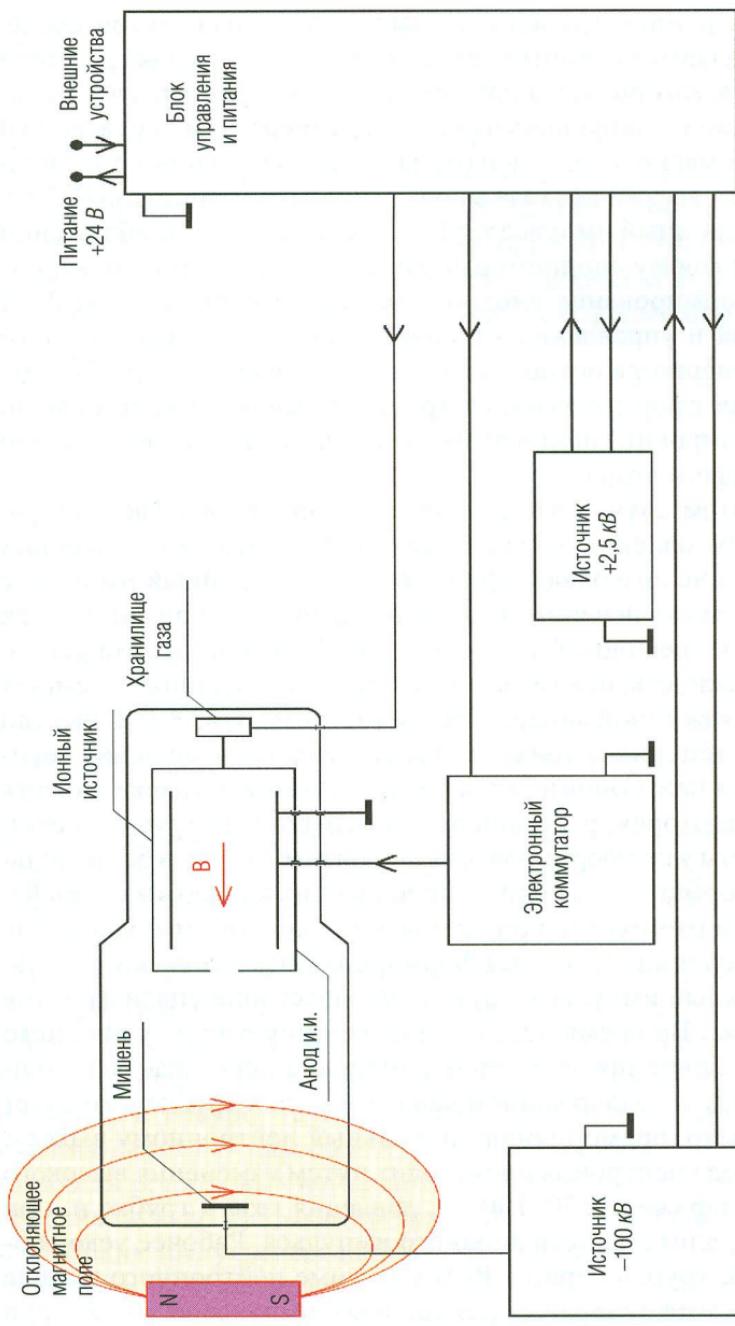


Рис. 3. Блок-схема включения трубы

В целом нейтронные трубы 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 трубы 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, "трапециевидные" 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 70–100 кВ, давления газа в трубке и, при необходимости, длительности анодного импульса. Рабочее ускоряющее напряжение трубы серии АРЕВ в режиме нейтронного выхода  $1 \cdot 10^8$  н/с и частоте генерации нейтронных импульсов 10 кГц при

скважности 5 составляет  $85 \text{ кВ}$ . Общее электропотребление генератора –  $14 \text{ Вт}$ . 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).

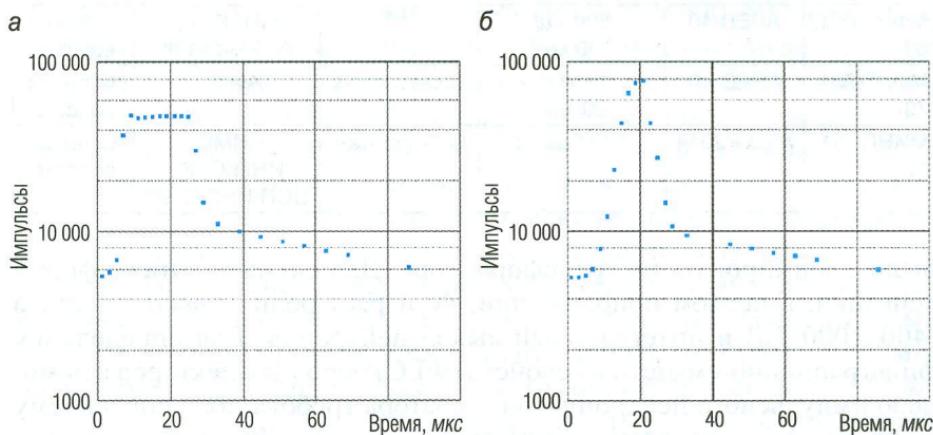


Рис. 4. Временные спектры в интегральных каналах аппаратуры типа АИМС:  
а – форма нейтронного импульса, генерируемая схемой с анодным трансформатором;  
б – форма нейтронной вспышки МФНГ

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 ( $10\text{--}20 \text{ мкс}$ ), который можно

Таблица 1

Основные характеристики генераторов нейтронов

Название генератора, диаметр, мм	Тип нейтронной трубы	Основной режим работы: частота/скважность	Решаемая геологическая задача	Тип скважинной аппаратуры	Состояние разработки
МФНГ-341, 34	APEB-28	500 Гц 400 мкс	Определение ФЕС коллекторов, сигма-каротаж	ПИЛК-42	Опробование
МФНГ-411, 41	APEB-28	500 Гц 400 мкс		ПИЛК-MWD	Разработка
МФНГ-601, 60	APEB-40	500 Гц 400 мкс		ПИЛК-76, АПРК-ПИЛК	На производстве
МФНГ-701, 70	APEB-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 сформировано 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 связанный воды и количеством сорбированных в коллекторе элементов с аномально высокими сечениями поглощения тепловых нейтронов. В первую очередь это Gd, B. При условии, что водород входит только в состав химически и физически связанный 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  $400\text{--}600\text{ Гц}$ , длительность нейтронного импульса  $400\text{--}500\text{ мкс}$ , выход нейтронов должен обеспечивать  $80\text{--}90\%$  от максимальной допустимой загрузки регистрирующего тракта во время нейтронного импульса (определяется геометрией регистрирующего зонда скважинного прибора, геологическим разрезом и конструкцией скважины), время между режимами работы нейтронной трубы да/нет на более  $1\text{ мкс}$ , 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  $50\text{ кГц}$ , длительность нейтронного импульса – от  $7\text{ мкс}$  до режима непрерывного излучения. Выход нейтронов до  $2 \cdot 10^8\text{ н/с}$  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.

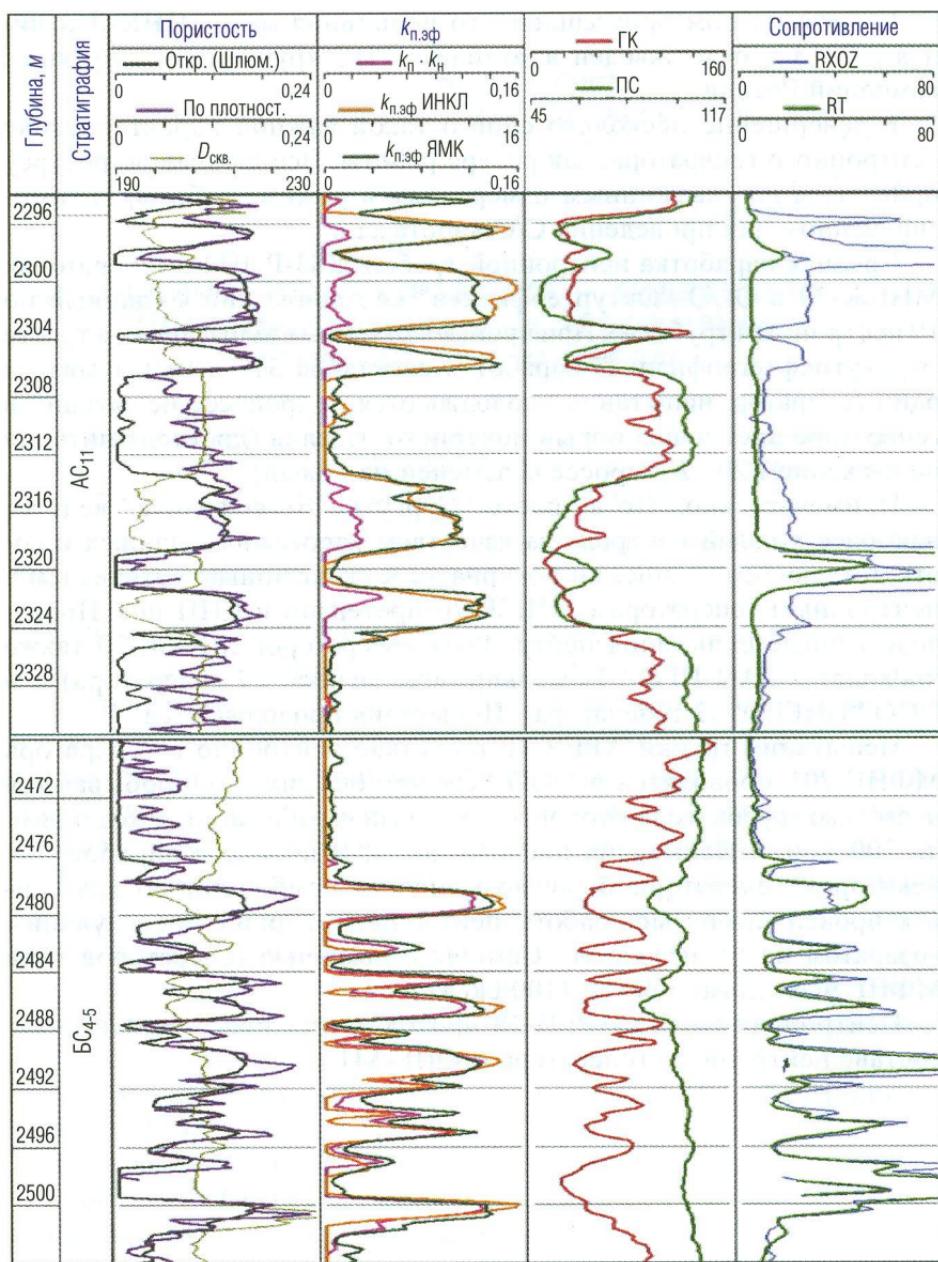


Рис. 5. Генератор МФНГ-601

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 водоро-

досодержание определялось по данным нейтронного каротажа по тепловым нейтронам со стационарным Ри–Ве 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 связку, 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 –  $k_{\text{п.эф}}$  по данным метода ЯМР компании Schlumberger; коричневый цвет –  $k_{\text{п.эф}}$  по данным метода ИНК-Л. Сиреневый цвет – произведение  $k_{\text{п.общ}} \times k_{\text{n}}$ . (В приближении, что коллектор полностью насыщен нефтью, данный параметр будет соответствовать эффективной пористости.) Причем пласт АС<sub>11</sub> водонасыщен, БС<sub>3-4</sub> 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 характеристики 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 трубы 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 (дроосселя 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 трубы 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 трубы с последующим возвратом на производство. Сегодня с помощью генераторов типа МФНГ исследовано более 1100 скважин.

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