



ЭНЕРГИЯ

Импульсные нейтронные генераторы разработки ООО «НПП Энергия» в скважинной геофизике

*Агалакова М.И., Бутолин С.Л., Черменский В.Г. (все ООО "НПП Энергия"),
Велижанин В.А. (ООО "Нефтегазгеофизика"), Бортасевич В.С. (ООО
"Октургеофизика"), Коротков К.В. (ОАО "Нижевартовскнефтегазгеофизика").*

Первые исследования, связанные с восстановлением работоспособности импульсных высокочастотных нейтронных генераторов были начаты в 2008г., когда ООО "Октургеофизика" были приобретены на 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 часов, в процессе работы часто проявлялись неисправности, выражающиеся в высоковольтных пробоях и отключениях генераторов на несколько минут, длительность и форма нейтронного импульса изменялась в недопустимых пределах. Все это негативно сказывалось на качестве геофизического материала. К слову сказать, предыдущая модель генератора ИНГ-06, на наш взгляд, 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 (Название модернизированного генератора МНГЖ-70). В 2009г. начались работы по консолидации сил в направлении разработок нейтронных высокочастотных газонаполненных трубок и генераторов на их основе совместно со специалистами ЭХП. В 2010 г. было зарегистрировано ООО "НПП Энергия", для которой это стало основным видом деятельности. В данном докладе разговор идет только об импульсных нейтронных генераторах на газонаполненных трубках. Нейтронные генераторы на вакуумных нейтронных трубках не рассматриваются, т.к. несмотря на их высокую надежность, простоту эксплуатации и относительно небольшие диаметры, они принципиально не обеспечивают возможность проведения измерений во время нейтронного импульса, что существенно ограничивает их область применения в современной геофизике.

На сегодняшний день для применения в скважинной геофизике разработаны и выпускаются два типа импульсных высокочастотных газонаполненных трубок максимальным диаметром 40мм и 28мм. Рабочие названия трубок соответственно АРЕВ-40 и АРЕВ-28. Поставив себе цель, чтобы эти трубки были на уровне лучших мировых образцов, их разработка опиралась на самые передовые технические и технологические достижения в мире. Для примера, составные детали нейтронных трубок и генераторов изготавливаются по документации ООО "НПП Энергия" на предприятиях в шести различных странах - Россия, Германия, Италия, Франция, США, Нидерланды. Технология сборки нейтронной трубки разработана совместно со специалистами ФГУП "Комбинат "ЭлектроХимПрибор", там же происходит и 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 фокусирующих 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. На рисунке 1 и 2 представлены нейтронные трубки АРЕВ-40 и АРЕВ-28 соответственно.

Для нейтронных трубок серии АРЕВ были разработаны блоки формирования высоких напряжений (БФВН) и алгоритмы поддержания стабильности работы (АПСР) на



ЭНЕРГИЯ

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.



Рис. 1



Рис.2

Блок-схема включения нейтронной трубки приведена на рисунке 3. В целом нейтронные трубки включены по классической схеме, "ноу-хау" здесь является схемотехнические и конструктивные решения отдельных узлов, алгоритмы поддержания рабочих режимов нейтронной трубки в условиях влияния дестабилизирующих факторов: температуры окружающей среды, внешних магнитных полей (намагниченные участки обсадной колонны и муфт), выработки газа в хранилище.



ЭНЕРГИЯ

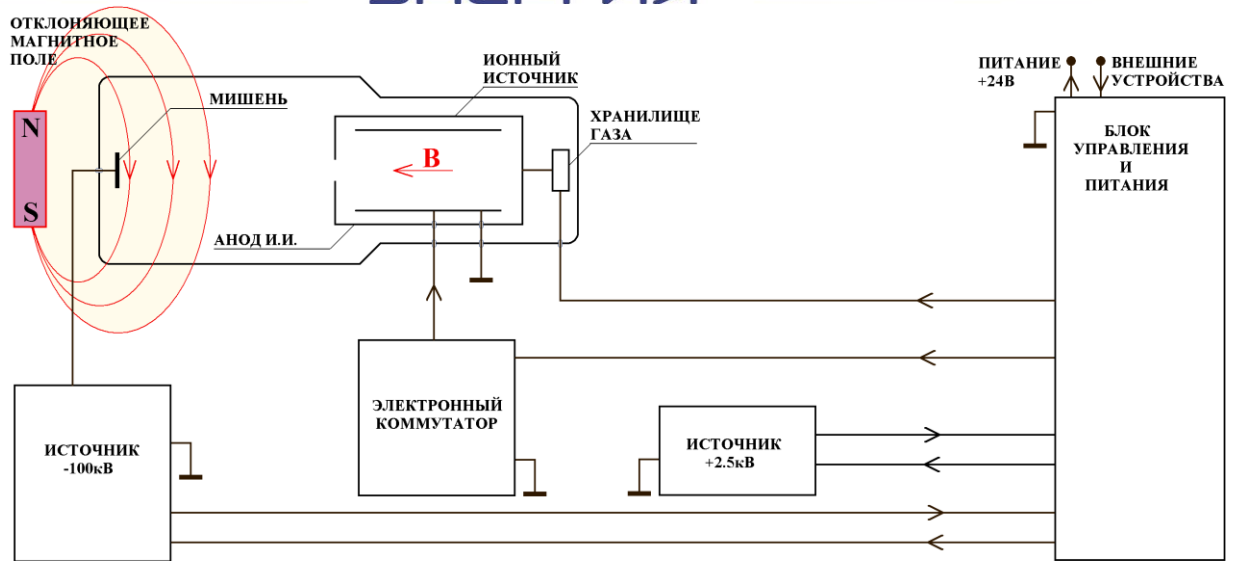


Рис. 3.

Например: Нейтронный импульс трубки имеет в первом приближении длительность и форму анодного импульса, подаваемого на нейтронную трубку. Формирование анодного импульса 2кВ 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 его размеров. Но даже в этом случае насыщение сердечника трансформатора, качество его изготовления, паразитные емкости анода и подходящих к нему проводов, все это 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 50-43мм. Качество геофизического материала при спектрометрии гамма-излучения неупругого рассеяния нейтронов в таком режиме работы нейтронного генератора начинает 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 5кВ/мксек. 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 $70 \div 100$ кВ, давления газа в трубке и, при необходимости, длительности анодного импульса. Рабочее ускоряющее напряжение трубки серии АРЕВ в режиме нейтронного выхода $1 \cdot 10^8$ н/сек и частоте генерации нейтронных импульсов 10кГц при скважности 5 составляет 85кВ. Общее электропотребление генератора составляет 14Вт. Генераторы, изготовленные на основе нейтронных трубок типа АРЕВ по описанным выше принципам, получили коммерческое название МФНГ (МногоФункциональный Нейтронный Генератор). На рисунке 4 показаны временные спектры, регистрируемые в интегральных каналах аппаратуры углеродно-кислородного каротажа типа АИМС. Форма нейтронной вспышки генератора



ЭНЕРГИЯ

МФНГ (справа) по своим характеристикам выгодно отличается от формы нейтронного импульса, генерируемой схемой с анодным трансформатором.

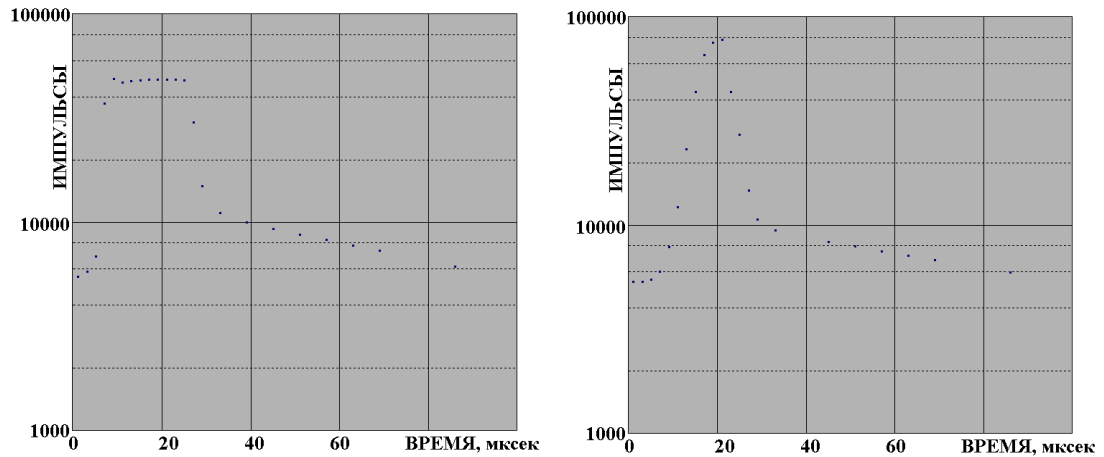


Рис.4.

В таблице 1 приведены основные данные по изготавливаемым нейтронным генераторам и их применениям. Это достаточно условная таблица, т.к. 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 сегодняшнего дня и с помощью существующих российских импульсных нейтронных генераторов. Первое было возможно благодаря относительно короткому нейтронному импульсу для С/О каротажа (10÷20мксек), который можно было сформировать на трансформаторе. Для Сигма-каротажа форма вспышки, в первом приближении, не играет роли - важна частота (400÷1000Гц) 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.

Таблица 1

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	500Гц/400мксек	Определение ФЕС коллекторов, Сигма-каротаж	ПИЛК-42	Опробование
МФНГ-411, 41	АРЕВ-28	500Гц/400мксек		ПИЛК-MWD	Разработка
МФНГ-601, 60	АРЕВ-40	500Гц/400мксек		ПИЛК-76, АПРК-ПИЛК	На производстве
МФНГ-701, 70	АРЕВ-40	10кГц/20мксек	С/О каротаж	АИМС	На производстве
МИНГ-701, 70	Ж83-Р2044	10кГц/мксек	С/О каротаж	АИМС, ИНГКС-95, ЦСП-ИНГКС-90	На производстве

С точки зрения авторов задача определения ФЕС пластов-коллекторов наиболее актуальна для будущего применения импульсных нейтронных источников, особенно в



ЭНЕРГИЯ

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 флюида, измеряя общее водородосодержание породы и макросечение поглощения тепловых нейтронов в ней, можно вычислить эффективную пористость коллектора. Соответственно, импульсный нейтронный генератор должен обеспечить такой режим работы, при котором возможно определять как общее водородосодержание, так и макросечение поглощения тепловых нейтронов. Оптимизация режимов работы, выполненная рядом ученых как в России, так и за рубежом, однозначно выходит на следующие цифры (в качестве регистрирующей рассматривается как минимум двухзондовая нейтронная установка): частота генерации нейтронов $400 \div 600$ Гц, длительность нейтронного импульса $400 \div 500$ мксек, выход нейтронов должен обеспечивать $80 \div 90\%$ 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 "излучение есть"/"излучения нет" на более 1 мксек, 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 мксек до режима непрерывного излучения. Выход нейтронов до $2 \cdot 10^8$ н/сек обеспечивает требования по интегральной нагрузке измерительного тракта практически всех известных зондов скважинной аппаратуры. В настоящий момент генератор МФНГ-601 для решения задач определения ФЕС пластов-коллекторов применяется в скважинной аппаратуре ПИЛК-76, в составе которой прошел промышленное опробование. На рисунке 5 приведен внешний вид МФНГ-601, выпускаемого с мая 2012 г.



Рис.5

Опробование собственно метода ИНК-Л для определения ФЕС пород-коллекторов началось при участии авторов в 2010 г. на нефтяных месторождениях в



ЭНЕРГИЯ

Западной Сибири. На первом этапе общее водородосодержание 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 20Гц. Понятно, что запись различными скважинными приборами, не интегрированными в единую связку, вносит дополнительные погрешности расчета эффективной пористости. Но на 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 получен положительный эффект. Для систематизации накопленного опыта и выработки методических инструкций в 2011÷2012г. данные работы были проведены на месторождениях в скважинах, где был проведен 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 рисунке 6 приведен планшет, наглядно демонстрирующий результат проведенных исследований. В колонке $K_{п\text{эфф}}$ черная кривая - $K_{п\text{эфф}}$ по данным метода ЯМР компании Schlumberger, коричневым цветом - $K_{п\text{эфф}}$ по данным метода ИНК-Л. Сиреневым цветом показана кривая, представляющая собой произведение $K_{п\text{общ}} * K_n$ (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 2300-2302м 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.

По результатам промышленного испытания метод ИНК-Л начиная с 2013г. введен в комплекс ГИС в крупнейшие нефтяные компании России.

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

Средняя наработка нейтронной трубки Ж83-Р2044 в генераторах МНГЖ-70 в ООО "Октургеофизика" составила 280 часов (данные по 19 нейтронным трубкам). При производственных испытаниях в тресте "Сургутнефтегеофизика" наработка составляет 317 часа (испытывается 1 генератор, испытания продолжаются, в процессе испытаний в генераторе произошел обрыв покупного изделия (дресселя питания напряжением 200В), дрессель 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 так же проходят в "Тюменьпромгеофизика" (4 генератора) и в ООО "ИнГео" (3 генератора). Испытания продолжаются.

Наработка трубки АРЕВ-40 в составе нейтронного генератора МФНГ-701 проводятся в ООО "Октургеофизика". На испытаниях находятся несколько трубок (генераторов) с текущими наработками, доходящими до 700-800 часов. Испытания



ЭНЕРГИЯ

продолжаются. В процессе испытаний некоторые генераторы были возвращены в лабораторию для корректировки алгоритмов работы нейтронной трубки с последующим возвратом на производство. На сегодняшний день генераторами типа МФНГ исследовано более 1100 скважин.

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

Резюме: Специалистами ООО "НПП Энергия" совместно со специалистами ФГУП "Комбинат "Электрохимприбор" разработаны и изготавливаются 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.



ЭНЕРГИЯ

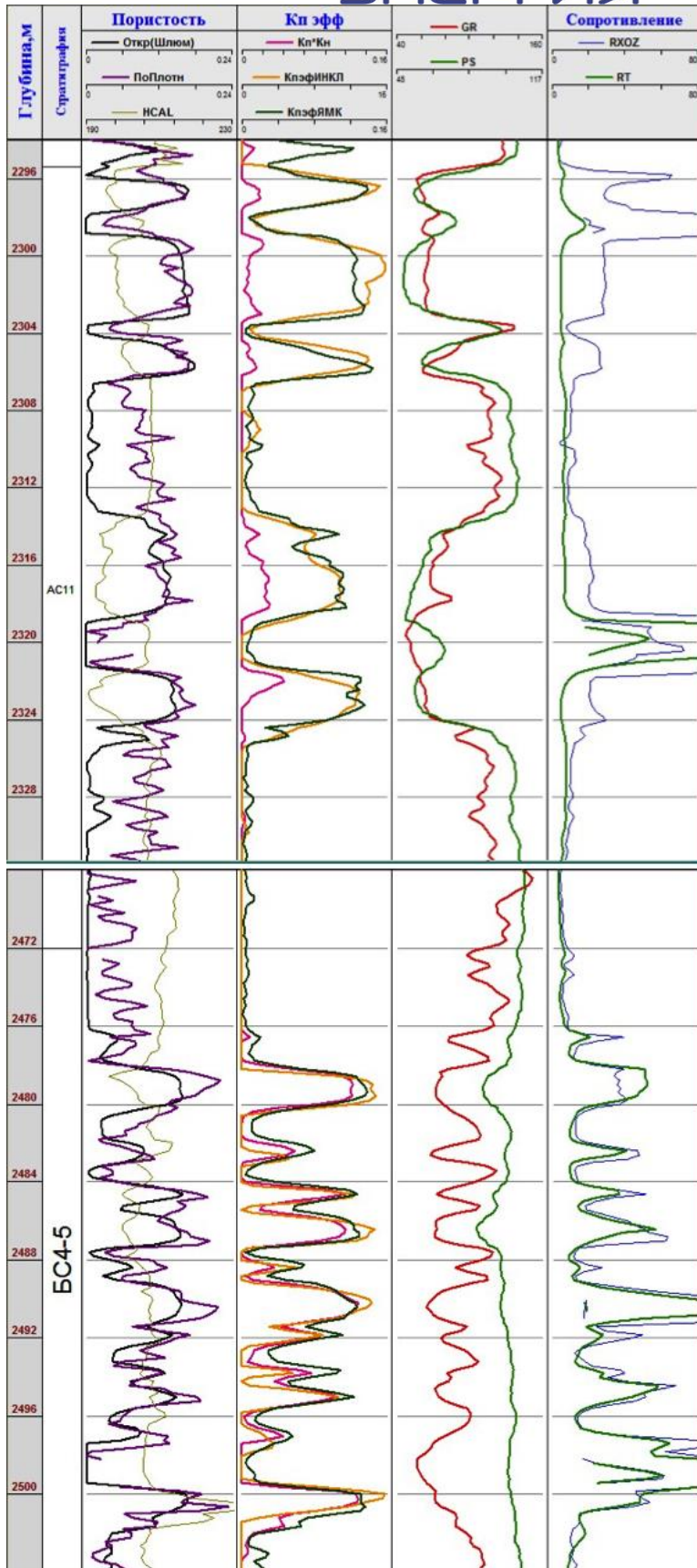


Рис. 6.