

На правах рукописи



ПЕРВУШИН ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АППАРАТУРЫ ГАММА – ГАММА
КАРОТАЖА ДЛЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН**

Специальность 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

д.г-м.н. Талалай А.Г.

Москва, 2017 г.

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет» и в Центре Метрологии и Сертификации ООО «Газпром георесурс».

Научный руководитель – Талалай Александр Григорьевич, доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геофизики ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Официальные оппоненты – Черменский Владимир Германович, доктор технических наук, генеральный директор ООО «НПП Энергия», г. Тверь

Иванов Юрий Владимирович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по производству ООО «Инновационные нефтегазовые технологии», г. Москва

Ведущая организация – ПАО НПП "ВНИИГИС", Башкортостан, 452614, г. Октябрьский, ул. Горького, 1

Защита состоится **«26» июня 2017 г. в 14:00** часов на заседании Диссертационного Совета Д 004.009.01 в ФГБУН Институте геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН по адресу: 620016, Россия, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН и на сайте www.igeoph.net.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный гербовой печатью, просим направлять по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, ИГФ УрО РАН, учёному секретарю диссертационного совета.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, профессор

 **Ю.В. Хачай**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. – Судьба нефтяных и газовых месторождений на всех этапах их существования определяется главным образом результатами скважинных геофизических исследований, позволяющих определить геологическое строение объектов разработки, осуществлять подсчет запасов нефти и газа, проводить мониторинг строительства скважин, контроль за разработкой и эксплуатацией месторождений, планировать различные технические мероприятия по интенсификации добычи.

Достоверность и точность результатов, получаемых при геофизических исследованиях скважин (ГИС), определяется, в том числе, уровнем метрологического сопровождения этих работ, метрология, в данном случае, является одним из определяющих факторов при анализе результатов скважинных исследований и как следствие оказывает существенное влияние на эффективность управления сырьевой базой нефтегазодобывающих компаний.

Каротаж, основанный на гамма-гамма методе, в нефтяных и газовых скважинах занимает важное место среди других видов каротажа при формировании современного комплекса геофизических исследований скважин в открытом и закрытом стволе.

В работах Булашевича Ю.П., Воскобойникова В.М., Гулина Ю.А., Дядькина И.Г., Уткина В.И., и др., отражены возможности гамма-гамма метода для количественного определения плотности и эффективного атомного номера горных пород. Наибольший вклад в развитие теоретических и методических возможностей аппаратуры гамма-гамма каротажа (ГГК) и ее метрологического обеспечения внесли ученые Арцыбашев В.А., Баембитов Ф.Г., Белоцерковец Ю.И., Блюменцев А.М., Варварин Г.Б., Гречухин В.В., Грумбков А.П., Головацкая И.В., Гольдштейн Л.М., Дунченко И.А., Калистратов Г.А., Куриленко Ф.Д., Кучурин Е.С., Лобанков В.М., Лухминский Б.Е., Лысенков А.И., Семенов Е.В., Филиппов Е.М., Шимелевич Ю.С., Хаматдинов Р.Т., Цирульников В.П. и др.

Традиционно в открытом стволе нефтяных и газовых скважин гамма-гамма метод в модификации плотностного гамма-гамма каротажа (ГГК-П), литоплотностного гамма-гамма каротажа (ГГК-ЛП) выполняется прижимными зондами и позволяет решать задачу по определению плотности горных пород, в том числе с учетом литологического состава пород, что является особенно актуальным в карбонатном разрезе, осложненным наличием доломитов, ангидритов.

Применение ГГК-П и ГГК-ЛП в комплексе с другими методами ГИС (нейтронными, спектрометрическим гамма каротажем) позволяет построить более полную петрофизическую модель коллектора и существенно повысить эффективность определения ее параметров.

Диаметр современной аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа составляет 73-76 мм. Для калибровки аппаратуры такого диаметра, использование стандартных образцов в виде полупластов, предложенных в 1959 году, приводит к возникновению дополнительной систематической ошибки, вызванной недостаточной экранировкой детекторов от прямого излучения источника гамма квантов. Для исключения этой ошибки в 2006-2008 году, независимо друг от друга, в Центре метрологических исследований УралГео г.Уфа и Центре метрологии и сертификации ООО «Газпром геофизика» г. Раменское были предложены и построены стандартные образцы плотности в виде насыщенных моделей, пересеченных скважиной. Однако масса-габаритные характеристики стандартных образцов требуют размещения их в объемных помещениях. Поэтому многие геофизические компании продолжают использовать стандартные образцы в форме полупластов.

В обсаженных и зацементированных скважинах гамма-гамма метод в модификации скважинного гамма-гамма дефектоскопа-толщиномера позволяет оценивать техническое состояние и толщину стенки обсадной колонны, а также плотность, состав и распределение цемента в заколонном пространстве скважины.

Аппаратура по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом отличается от аппаратуры открытого ствола ГГК-П тем, что ее необходимо центрировать относительно оси обсадной колонны, а также использованием от трех до восьми (в зависимости от модификации аппаратуры) детекторов большого зонда для оценки азимутального распределения цементного камня.

Обсаженная скважина представляет собой многослойную конструкцию: стальная обсадная колонна, слой цементного камня, горные породы, окружающие скважину. Первые метрологические установки для аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин воспроизводили параметры двух сред: толщину стенки обсадной колонны и интегральную плотность заколонного пространства, что, в свою очередь, позволяло использовать аппаратуру по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом лишь на качественном уровне. Появившиеся позже модели обсаженных скважин (МОС) воспроизводят плотность цементного камня и плотность горных пород в узком диапазоне.

Таким образом, совершенствование нормативных, методических и технических средств метрологического обеспечения аппаратуры гамма-гамма каротажа позволяет существенно повысить достоверность результатов скважинных исследований и, как следствие, повышение эффективности решений геологических и технологических задач разведки, и разработки месторождений нефти и газа.

Объект исследования – технология (методика и техническое оснащение) средств метрологического обеспечения аппаратуры гамма-гамма каротажа для нефтегазовых скважин.

Предмет исследования – факторы, влияющие на точность результатов измерений аппаратурой гамма-гамма каротажа.

Цель исследований:

- повышение технологичности и эффективности калибровки аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа для открытого ствола нефтегазовых скважин;
- повышение точности определения плотности цементного камня и толщины стенки обсадной колонны при контроле технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом.

Идея работы – создание комплекса технических средств и методики их применения для определения и контроля метрологических характеристик аппаратуры гамма-гамма каротажа в условиях максимально приближенных к условиям измерений в скважинах.

Задачи исследований

- анализ существующих технологий метрологического обеспечения аппаратуры гамма-гамма каротажа и выявление не учитываемых ими факторов, влияющих на точность результатов измерений;
- разработка средств и методик метрологического обеспечения аппаратуры гамма-гамма каротажа, позволяющих определять функции влияния различных факторов на метрологические характеристики аппаратуры в рабочих условиях измерений;
- внедрение разработанных технологий метрологического обеспечения аппаратуры гамма-гамма каротажа в практику геофизических исследований скважин на нефтегазовых месторождениях.

Методы исследований – анализ научно-технической информации; аналитические исследования физических свойств горных пород и материалов; математическое и физическое моделирование измерений в скважинах и в стандартных образцах горных пород; создание и исследование макетов разрабатываемого метрологического оборудования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Конструкция стандартных образцов плотности и эффективного атомного номера горных пород в виде «насыщенных» по размеру моделей пластов, пересеченных скважиной, позволяющих в одной модели определить три значения плотности и эффективного атомного номера горных пород.

2. Конструкция калибровочной установки для аппаратуры контроля технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом, позволяющая учитывать влияние плотности горной породы.

3. Техническое решение по конструкции трех зондовой скважинной геофизической аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом, позволяющая определять параметры обсадной колонны и цементного камня с учетом влияния плотности породы за одну спускоподъемную операцию.

Научная новизна работы:

Предложены и исследованы стандартные образцы плотности и эффективного атомного номера горных пород в виде насыщенных по размеру моделей пластов, пересеченных скважиной, воспроизводящие, в одном корпусе стандартных размеров, три значения плотности и эффективного атомного номера с сохранением точностных характеристик полноразмерных образцов. При этом в три раза снижена радиационная нагрузка на персонал, выполняющий калибровку, и уменьшены весогабаритные характеристики.

Для снижения погрешности определения плотности и эффективного атомного номера горных пород применена методика базовой калибровки аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа, которая рекомендует получение нормировочного коэффициента по совокупности всех стандартных образцов, участвующих в калибровке.

Калибровочная установка для аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом конструктивно максимально приближена к конструкции реальных скважин, имеет трехслойную конструкцию, что позволяет перейти к количественной интерпретации данных полученных аппаратурой типа СГДТ.

Предложенная конструкция трехзондового прибора по контролю технического состояния обсаженных скважин позволяет определять параметры цементного камня и обсадной колонны за одну спускоподъемную операцию, с учетом влияния плотности породы.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций:

- предложенные технические решения по метрологическому обеспечению аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа позволили уменьшить погрешность и согласованность скважинных измерений, что нашло свое подтверждение в повышении воспроизводимости результатов скважинных измерений, проводимых различными типами аппаратуры;

- обоснованность и достоверность результатов скважинных и модельных измерений, выполненных аппаратурой по оценке технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом, подтверждается сопоставлением результатов обработки с учетом влияния на них плотности породы и без. Разброс результатов без учета и с учетом плотности породы может достигать 300%, что однозначно указывает на необходимость получения градуировочных

зависимостей на образцах, имеющих трехслойную конструкцию. Для эффективного решения этой проблемы при каротаже была предложена трехзондовая конструкция скважинного прибора. Создан полнометражный макет скважинного прибора и проведено математическое моделирование, позволяющее учитывать влияние плотности породы.

Практическая значимость работы:

Созданы средства и методики измерения параметров аппаратуры гамма-гамма каротажа, позволяющие в конечном итоге повысить точность и достоверность результатов скважинных измерений, осуществленных этой аппаратурой, что в свою очередь, повышает обоснованность принимаемых на их основании решений.

Особенность конструкции стандартных образцов плотности и эффективного атомного номера горных пород, позволяет, как минимум вдвое, сократить время, затрачиваемое на калибровку аппаратуры, а также снизить радиационную нагрузку на персонал, выполняющий работы по калибровке.

Проведение измерений с применением новой трехзондовой скважинной аппаратуры по оценке технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом позволит определять параметры обсадной колонны и состояние цементного камня за одну спускоподъемную операцию без привлечения дополнительных данных плотностного каротажа, измеренных в открытом стволе скважины.

Реализация результатов работы:

Результаты исследований использованы при создании метрологического оборудования для аппаратуры гамма-гамма каротажа, позволяющего повысить точность результатов измерений.

Метрологическая установка для калибровки аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом внедрена в Центре метрологии и сертификации (ЦМиС) ООО «Газпром георесурс» в 2007 году.

Стандартные образцы плотности и эффективного атомного номера горных пород в виде «насыщенных» по размеру моделей пластов, пересеченных скважиной, позволяющих в одной модели определить три значения плотности и эффективного атомного номера горных пород внедрены в производственный филиал ПФ «Иркутскгазгеофизика» ООО «Газпром георесурс».

Разработанная методика базовой градуировки и калибровки аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа внедрена в производственные филиалы ООО «Газпром георесурс»

Конструкция трехзондовой скважинной аппаратуры для контроля технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом предложена для промышленного внедрения ведущим разработчикам геофизического оборудования в РФ.

Личный вклад автора:

Автор принимал участие в разработке метрологической установки для калибровки аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом. В процессе разработки автор провел анализ существующего метрологического оборудования для аппаратуры гамма-гамма каротажа по контролю технического состояния обсаженных скважин и методик выполнения измерений. Провел обработку результатов измерений аппаратурой СГДТ-НВ в калибровочной установке.

По результатам измерений в калибровочной установке подготовил исходные данные для создания математической модели для разработки трехзондовой аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом, провел апробацию макетного образца скважинного трехзондового прибора.

Автором проведен анализ существующего метрологического обеспечения аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа. Автор предложил конструкцию стандартных образцов плотности и эффективного атомного номера горных пород, в виде насыщенных моделей пластов, пересеченных скважиной, позволяющая определять три значения плотности и эффективного атомного номера горных пород, принимал участие в разработке технической документации и их изготовлении образцов. Провел обработку результатов измерений в образцах различных типов скважинной аппаратуры.

Апробация работы:

Основные результаты и научные положения работы докладывались на XX, XXI научно-практической конференции «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин» (НПФ «Геофизика» г. Уфа, 2014, 2015гг.); Научно-технический семинар «Аппаратура радиоактивного каротажа для современных технологий добычи углеводородного сырья» (ФГУП «ВНИИА» им. Н.Л. Духова, г. Москва, 2015г.).

Публикации:

Основные положения диссертации опубликованы в четырех работах 2014-2016 годах, в том числе одном рецензируемом научном издании, входящем в перечень ВАК, в четырех патентах РФ на полезную модель и двух патентах РФ на изобретение.

Структура и объем работы:

Диссертация изложена на 120 страницах печатного текста, состоит из введения, трех глав и заключения, 24 таблиц и 40 рисунков, список литературы содержит 69 источников.

Автор выражает признательность научному руководителю д.г.-м.н., заведующему кафедрой геофизики Уральского Государственного Горного Университета Талалаю А.Г. за помощь в подготовке диссертации. Автор выражает глубокую признательность коллегам по работе к. т. н. Громову Е.В., к. ф.-м. н. Цейтлину В.Г., к. г.-м. н. Цирульникову В.П. за непосредственное участие и помощь в написании диссертации.

За помощь при выполнении измерений автор выражает признательность сотрудникам Центра метрологии и сертификации ООО «Газпром георесурс» Вавилину Ф.И., Романову Е.Д.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, цели и задачи исследования, предложены методы исследования, сформулированы научные положения, научная новизна и практическая значимость работы, реализация и апробация работы, а также личный вклад автора.

В первой главе изложены физические основы гамма-гамма метода, рассмотрены основные геологические и технические задачи, решаемые с использованием данного метода, в процессе геофизических исследований скважин, проведен анализ состояния существующего метрологического обеспечения аппаратуры гамма-гамма каротажа и методик выполнения измерений.

Наиболее распространенным средством метрологического обеспечения аппаратуры плотностного гамма-гамма каротажа являются Государственные стандартные образцы плотности и стандартные образцы предприятия в виде полупластов с ложементом для размещения прибора. Эти же стандартные образцы являются основой метрологического обеспечения измерения индекса фотоэлектрического поглощения P_e . Однако имеющийся набор этих образцов не позволяет отдельно оценить влияние плотности породы и индекса

фотоэлектрического поглощения на показания в каналах аппаратуры литоплотностного каротажа.

Кроме того, при калибровке аппаратуры диаметром менее 90 мм на таких образцах возникает дополнительная систематическая погрешность за счет наличия прямого потока гамма квантов по воздуху от источника к детекторам измерительных каналов. При этом уровень этой погрешности зависит от конструкции зондовой части скважинного прибора – его диаметра, формы прижимного «башмака», коллимационных окон, степени экранирования детекторов от прямого потока гамма квантов и т. д. Для приборов диаметром менее 90 мм эта систематическая погрешность становится значимой.

Указанный недостаток устраняется при использовании стандартных образцов в виде полноразмерных моделей пластов, пересеченных скважиной. В этом случае условия измерений при калибровке максимально приближены к условиям измерений в скважине. Однако полноразмерные образцы имеют один недостаток по отношению к полупластам – это их размеры. Не все геофизические компании могут позволить размещение полноразмерных образцов в своих метрологических центрах. Поэтому многие продолжают по-прежнему использовать полупласты в качестве образцов для метрологического обеспечения аппаратуры плотностного и литологического каротажа.

Появившаяся сравнительно недавно при исследовании нефтяных и газовых скважин, аппаратура литоплотностного гамма-гамма каротажа, очень быстрыми темпами стала набирать популярность у заказчиков геофизических услуг. Калибровка аппаратуры литоплотностного каротажа имеет ряд некоторых особенностей, из-за которых, используемые стандартные образцы плотности для аппаратуры плотностного каротажа, не должным образом обеспечивают метрологическое обеспечение данной аппаратуры.

Первые калибровочные установки для аппаратуры по определению технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом, были разработаны в середине 70-х годов. Они воспроизводили три значения плотности материала за колонной при одной толщине стенки колонны и по три значения толщины стенки колонны при одной плотности. Одним из существенных недостатков этой установки – это то, что использовались не калиброванные по толщине стенки трубы. В последующем при разработке и конструировании стандартных образцов для аппаратуры по оценке технического состояния обсаженных скважин стали использовать проточенные стальные трубы, как с наружи, так и изнутри. При этом они устанавливались в однородную бесконечную среду с различной плотностью. Однако при всем этом реальная конструкция обсаженной скважины сильно отличается от предложенной двухслойной конструкции (стальная труба, за колонное пространство) стандартных образцов и представляет собой трехслойную систему включающую в себя стальную трубу, цементное кольцо и вмещающие породы. Поэтому проводить количественную интерпретацию скважинных измерений по зависимостям, полученным в двухслойных образцах невозможно.

В первой главе диссертации сформулированы основные недостатки существующего метрологического обеспечения при использовании его для калибровки современной скважинной аппаратуры гамма-гамма каротажа. Определены цели, задачи и методы их решения.

Во второй главе рассмотрены этапы создания современного метрологического оборудования для аппаратуры плотностного и литоплотностного каротажа нефтегазовых скважин.

В качестве исходного эталона объемной плотности ($\rho_{об}$) и эффективного атомного номера горных пород ($Z_{эф.}$), при участии автора в Центре Метрологии и Сертификации ООО «Газпром

георесурс», разработан и изготовлен ряд специализированных стандартных образцов для аппаратуры плотностного и литоплотностного каротажа, которые представляют собой цилиндрические модели пластов, пересеченных скважиной (полноразмерные СО). Высота и диаметр моделей составляют 1000 мм, диаметр скважины - 200 мм. Скважины заканчиваются заглушенным зумпфом.

Размеры стандартных образцов обеспечивают насыщенность поля гамма-излучения на уровне не менее 95%.

Для изготовления образцов использовались следующие материалы:

- монолитный блок CaCO_3 размером 1000×1000×1000 мм;
- прутки алюминиевые марки АД-0 размером $\text{Ø}800 \times 850$ мм;
- щебень CaCO_3 фракцией 10-20 мм;
- песок CaCO_3 фракцией 0,2-0,5 мм;
- щебень SiO_2 фракцией 10-20 мм;
- песок SiO_2 фракцией 0,2-0,5 мм;
- питьевая вода (ГОСТ Р51232-98).

Всего в комплект входит 9 стандартных образцов, состав и параметры которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Метрологические характеристики стандартных образцов плотности и эффективного атомного номера ООО «Газпром георесурс»

Индекс СО.	Состав СО		$\rho_{\text{об.}}$, кг/м ³	$\rho_{\text{эв.}}$, кг/м ³	$Z_{\text{эфф}}$
	Матрица	Насыщенность			
СОГГК-ЛП-1	CaCO_3 монолит	Вода	2710	2693	15,71
СОГГК-ЛП-2	Al марки АД-0	-	2700	2590	13,12
СОГГК-ЛП-3	$\text{CaCO}_3(\text{к})+\text{SiO}_2(\text{м})$	Вода	2407	2407	14,61
СОГГК-ЛП-4	$\text{SiO}_2(\text{м})$	Вода	2020	2020	11,28
СОГГК-ЛП-5	SiO_2 (м)	Воздух	1698	1625	11,79
СОГГК-ЛП-6	$\text{SiO}_2(\text{к})+\text{SiO}_2(\text{м})$	Воздух	2181	2144	11,79
СОГГК-ЛП-7	$\text{SiO}_2(\text{к})+\text{CaCO}_3(\text{м})$	Воздух	2198	2162	13,26
СОГГК-ЛП-8	$\text{CaCO}_3(\text{к})+\text{SiO}_2(\text{м})$	Воздух	2262	2231	14,82
СОГГК-ЛП-9	$\text{CaCO}_3(\text{к})+\text{CaCO}_3(\text{м})$	Воздух	2276	2246	15,71

Номенклатура параметров СО подбиралась так, чтобы с одной стороны максимально перекрыть диапазон измерений плотности и эффективного атомного номера, а с другой – обеспечить возможность отдельно оценить влияние каждого из этих параметров на результаты измерений. С этой целью были созданы образцы, имеющие практически одинаковую плотность, но существенно различающиеся по эффективному атомному номеру $Z_{\text{эфф}}$ образцы 6-9 (в таблице 1).

Значения характеристик образцов рассчитывались исходя из их минерального состава, который определялся объемно - весовым методом в процессе изготовления образцов. При оценке погрешностей параметров учитывались погрешности состава и неоднородность распределения материала в объеме образцов. Полная относительная погрешность значений плотности не превосходит 0,5 %, а параметра $Z_{\text{эфф}}$. – 0,2 абс.

Описанный комплект стандартных образцов плотности и эффективного атомного номера горных пород, включающий девять стандартных образцов, требует для его размещения площади

не менее 20м^2 , которые не все метрологические участки могут себе позволить. Тем более такой номенклатурный перечень образцов необходим только на этапе получения базовой градуировочной характеристики и оценке влияющих факторов на характеристики аппаратуры.

Проведение периодической калибровки аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа не требует измерений в таком количестве образцов, достаточно измерений в трех точках соответствующих верхнему, нижнему и середине диапазона измерений аппаратуры.

В этой связи автором была предложена конструкция метрологической установки (рисунок 1.) для аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа, содержащая в одном корпусе стандартных размеров, три стандартных образца в виде моделей пластов, пересеченных скважиной, воспроизводящих, с требуемой точностью, три значения плотности и эффективного атомного номера горных пород.

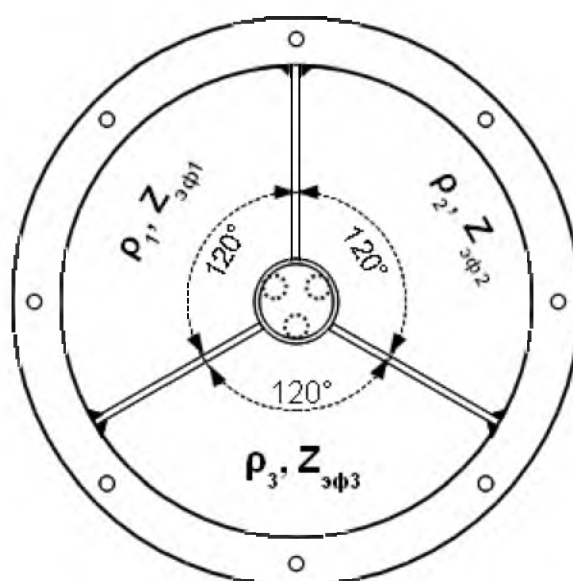


Рис. 1 Метрологическая установка для калибровки аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа, воспроизводящая три значения плотности и эффективного атомного номера горных пород.

Конструктивно установка представляет собой цилиндрический металлический корпус диаметром 1000мм и высотой 850мм, вдоль продольной оси которого установлена тонкостенная стеклопластиковая труба. В корпусе радиально установлены, три вертикальные перегородки, герметично соединенные со стенкой корпуса, его дном и стеклопластиковой трубой, образуя одинаковые, изолированные друг от друга секции. Каждая из этих секций заполнена материалом с заданной плотностью и эффективным атомным номером. При этом значения плотностей и эффективного атомного номера горных пород в контейнерах должны перекрывать весь диапазон измерения аппаратуры плотностного и литоплотностного каротажа.

Воспроизводимые значения параметров экспериментальной установки такой конструкции приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры, воспроизводимые экспериментальной установкой.

№ секции	Состав	ρ , кг/м ³	$Z_{эф}$
1	CaCo ₃ , SiO ₂ , вода	2410	14,61
2	SiO ₂ , воздух	1625	11,79
3	SiO ₂ , CaCo ₃ , воздух	2250	15,71
2*	BaSO ₄ , CaCo ₃ , вода	3200	-

Для оценки возможного влияния свойств материала, находящегося в секциях, противоположных направлению коллимационных окон, секция № 2 первоначально была заполнена материалом, содержащим барит и имеющим плотность ~ 3200 кг/м³ (строка 2* в таблице 2). С таким заполнением секций были проведены измерения прибором 2ГГКП, после чего секция № 2 была заполнена сухим песком и проведены измерения двумя приборами разных типов (конструкций, марок) - ГГК2, ГГКЛП, которые предварительно были откалиброваны на стандартных образцах СО-ГГКЛП.

Полученные данные (рисунок 2) убедительно показывают, что предложенная метрологическая установка полностью отвечает предъявляемым к ней требованиям:

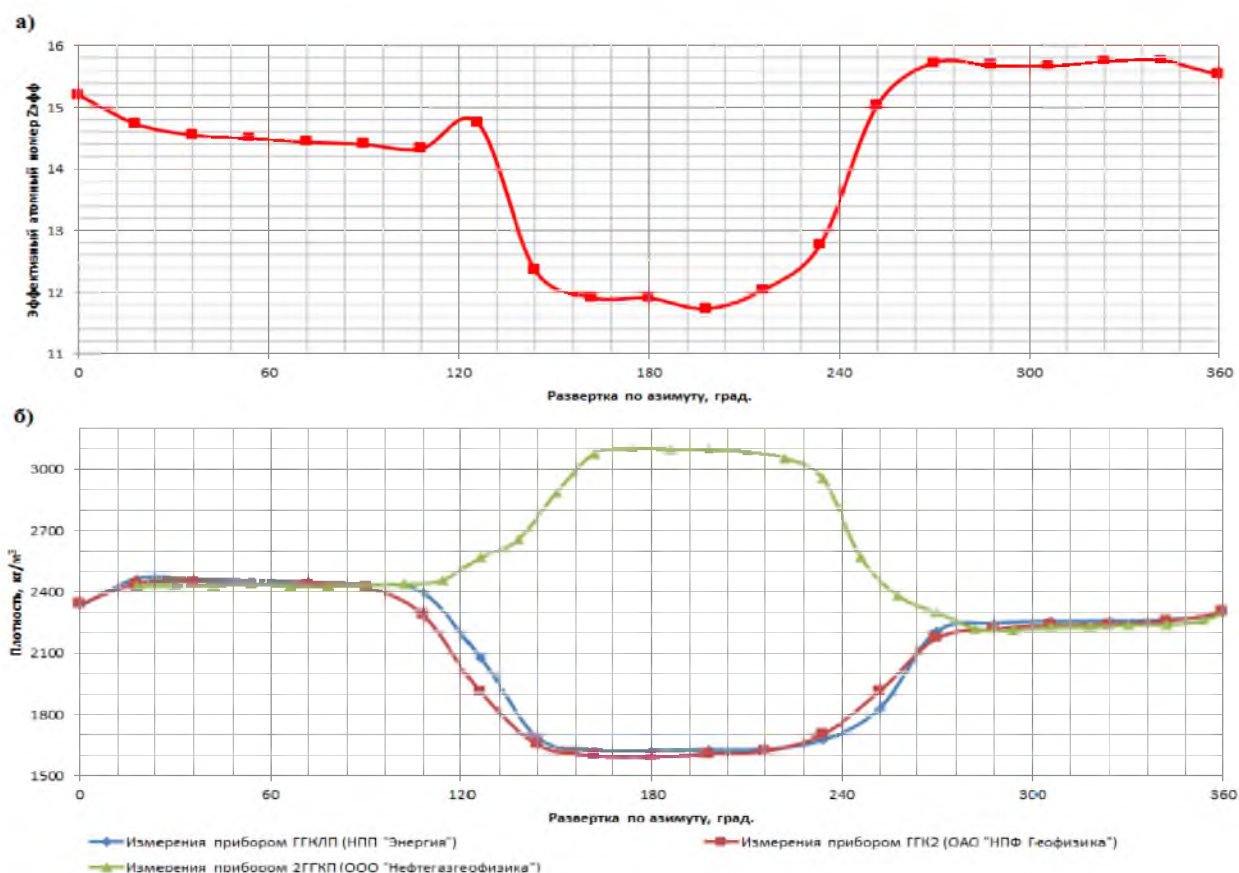


Рис. 2 а) оценка азимутальной неоднородности по параметру $Z_{эфф}$

б) оценка азимутальной неоднородности по плотности ρ

- размеры стандартных образцов обеспечивает насыщенность поля гамма-излучения на уровне не менее 95%;
- для всех секций различия значений плотности, полученных тремя разными приборами, совпадают между собой и с соответствующими значениями, рассчитанными по компонентному составу образцов, не превышают 0.7%;
- на диаграммах в каждой секции имеются однородные протяженные участки, значения плотности в которых не искажены влиянием соседних секций;
- измеренные значения плотности и эффективного атомного номера горных пород в однородных участках секций № 1 и № 3 не зависят от свойств материала, заполняющего противоположную секцию.

Разработанная конструкция метрологической установки для аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа, позволяет снизить затраты на изготовление

стандартных образцов, уменьшает в три раза радиационную нагрузку при проведении калибровки, а также снижает время, затрачиваемое на калибровку.

В третьей главе рассмотрены этапы создания современного метрологического оборудования для аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных, нефтегазовых скважин гамма-гамма методом.

Гамма-гамма каротаж является одним из наиболее распространенных методов определения технического состояния скважин. Реализация этого метода осуществляется скважинной аппаратурой для оценки технического состояния обсаженных скважин типа СГДТ и ЦМ.

Используемое на сегодняшний день метрологическое оборудование для аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом позволяет не в должной мере учитывать влияние плотности породы на результаты определения параметров цементного камня и толщины стенки колонны.

Разработанная автором и внедренная в Центре метрологии и сертификации ООО «Газпром георесурс» метрологическая установка для аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин позволяет получить зависимости для определения плотности и толщины стенки с учетом плотности породы.

Установка предназначена для определения метрологических характеристик и выполнения калибровок аппаратуры, реализующей контроль технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом (типа СГДТ).

Скважина и около скважинное пространство имитируется парой блоков (рисунок 3). Блоки раздвигаются при помощи специального устройства для установки колонны с цементным кольцом и затем сдвигаются для плотного охвата цементного кольца.

В состав установки входит четыре таких блока, каждая из которых воспроизводит определенное значение плотности: 1000, 1590, 1980, 2410 кг/м³.

Колонна с цементным кольцом представляет собой сменную вставку (рисунок 4). Колонны имеют различные толщины стенок и плотности цемента. Цементное кольцо может быть, как эксцентричным, так и центрированным относительно оси колонны.

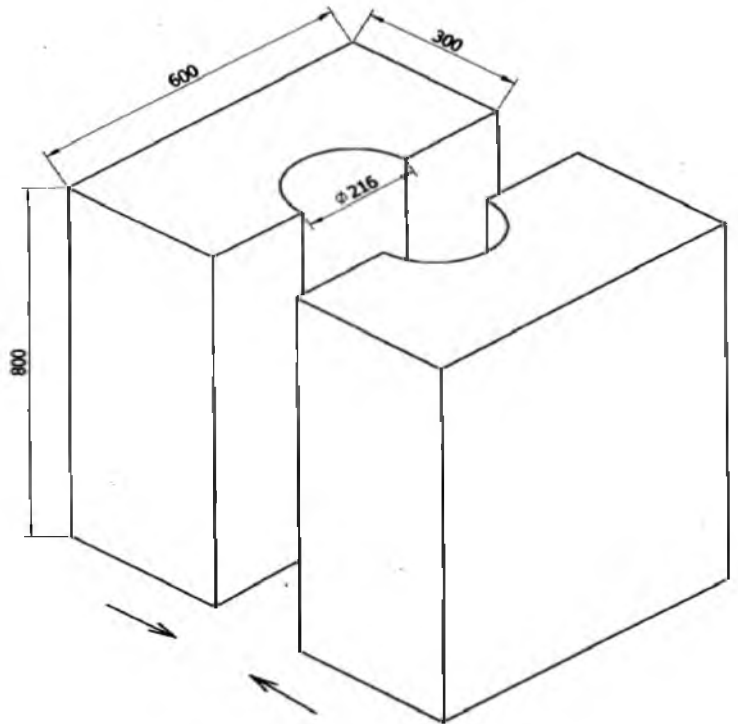


Рис. 3. Внешний вид блоков пары

Обсадные колонны состоят из трех соосно расположенных и герметично соединенных секций.

Цементное кольцо располагается на центральной калиброванной секции.

Конструкция калибровочной установки для диаметра скважины 216мм позволяет использовать неограниченное количество имитаций обсадных колонн.

На сегодняшний день в состав метрологической установки входит девять эталонных обсадных колонн с внешним диаметром $\varnothing 146\text{мм}$. и четыре колонны с внешним диаметром $\varnothing 168\text{ мм}$.

Аттестованными метрологическими характеристиками метрологической установки являются: толщина стенки стальной колонны, плотность цементного камня и погрешность их аттестованных значений (таблица 3).

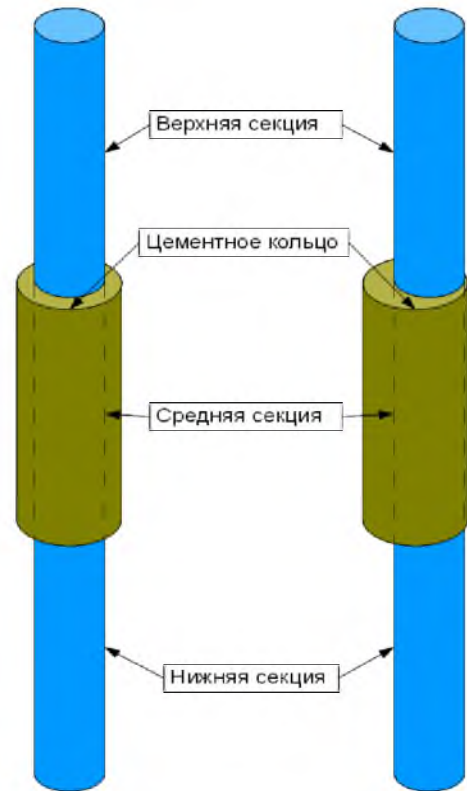


Рис.4 Конструкция обсадных колонн

Таблица 3. Аттестованные значения толщины стенки колонны и плотности цементного камня.

№ кол.	D мм	H, мм	Цементное кольцо	
			Плотность кг/см ³	Положение колонны в скважине
1	145.87	7.86	1967	Коакс.
2	145.86	7.86	1948	Эксцентр.
3	145.83	7.75	1000	Эксцентр.
4	145.80	7.82	1535	Эксцентр.
5	145.87	8.82	1963	Эксцентр.
6	145.77	5.83	1967	Эксцентр.
7	145.83	7.75	1000	Коакс.
8	145.83	7.75	1450	Коакс.
9	145.83	7.75	1847	Коакс.
10	165,80	8,77	1968	Эксцентр.
11	165,85	8,83	1570	Эксцентр.
12	165,86	10,83	1967	Эксцентр.
13	165,87	6,40	1967	Эксцентр.

Погрешность аттестованных значений толщины стенки, центральной части, стальной колонны не превосходит 0.05мм, а погрешность аттестованных значений плотности цементного камня не более 50 кг/м³.

На рисунке 5 представлено схематическое изображение калибровочной установки в сборе.

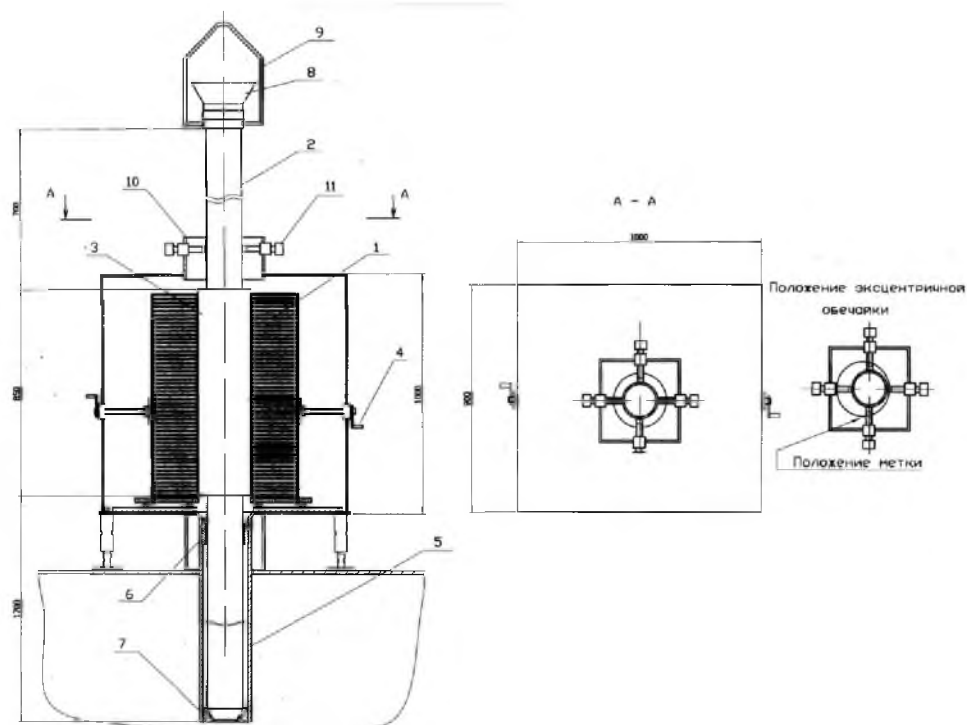


Рис. 5 Калибровочная установка. Общий вид.

1-блоки, воспроизводящие плотность породы; 2-обсадная колонна; 3-цементное кольцо; 4- рукоятки передвижения блоков; 5-труба зумпфа; 6-центрирующий вкладыш; 7-седло зумпфа; 8-воронка; 9-подъемная серья; 10-горловина; 11-съемные винты центровки

Как было сказано выше, номенклатура обсадных колонн, входящих в состав калибровочной установки для аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом, состоит из колонн диаметром 146 мм (5") и 168 мм (6"). Наиболее распространенной аппаратурой, на российском геофизическом рынке, позволяющей исследовать скважины, обсаженные такими колоннами, является аппаратура СГДТ-НВ и СГДТ-100М.

С использованием калибровочной установки был проведен полный спектр метрологических испытаний для аппаратуры СГДТ-НВ.

Для оценки чувствительности зондов аппаратуры к различным факторам, аппаратурой СГДТ-НВ были проведены измерения во всех эталонных обсадных колоннах (таблица 3) при различных плотностях внешней среды, воспроизводимых раздвижными блоками.

Номенклатура воспроизводимых параметров метрологической установки для аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом позволяет оценить чувствительность зондов аппаратуры к следующим параметрам:

- толщины стенки колонны ($H_{ст}$);
- плотности цементного камня ($\rho_{ц}$);
- плотности породы ($\rho_{п}$);
- эксцентриситета колонны относительно оси скважины.

Для оценки чувствительности зондов на изменение толщины стенки колонны $H_{к}$, использовались результаты измерений в колоннах №№ 2, 5, 6 (см. таблицу 3) при различных плотностях породы. Для оценки чувствительности зондов к плотности цементного камня $\rho_{ц}$

использовались результаты измерений в колоннах №№ 2, 3, 4 (см. таблицу 3) при различных плотностях породы.

При исследовании чувствительности зондов к изменению толщины стенки колонны и плотности цементного камня установлено:

- конструкция малого зонда обеспечивает его чувствительность только к изменению толщины стенки стальной обсадной колонны, изменение плотности цемента или плотности породы он практически не чувствует.

- большой зонд чувствителен к изменению всех трех параметров: толщины стенки обсадной колонны, плотности цементного камня и плотности породы, если показания малого зонда, позволяют учесть влияние толщины стенки колонны на показания большого зонда, то влияние плотности породы учесть невозможно.

На рисунке 6 представлено сопоставление чувствительности большого зонда к изменению плотности цементного камня и плотности породы, из которого видно, что показания большого зонда примерно одинаково чувствительны к изменению плотности цементного камня и плотности породы. Поскольку диапазон изменения плотности осадочных пород соизмерим с диапазоном изменения плотности цемента, то вариации плотности породы в исследуемом разрезе будут вызывать такие же по величине изменения показаний большого зонда, как и изменение плотности цемента, то есть при изменении плотности породы $\sim 300\text{-}400\text{ кг/м}^3$ показания большого зонда изменятся так, как при этом изменилась плотность цемента на те же $300\text{-}400\text{ кг/м}^3$. Это указывает на то, что для корректного определения плотности цементного камня, необходимо учитывать плотность горной породы. Из анализа представленных графиков видно, что поправка за влияние плотности горной породы представляет некую линейную функцию.

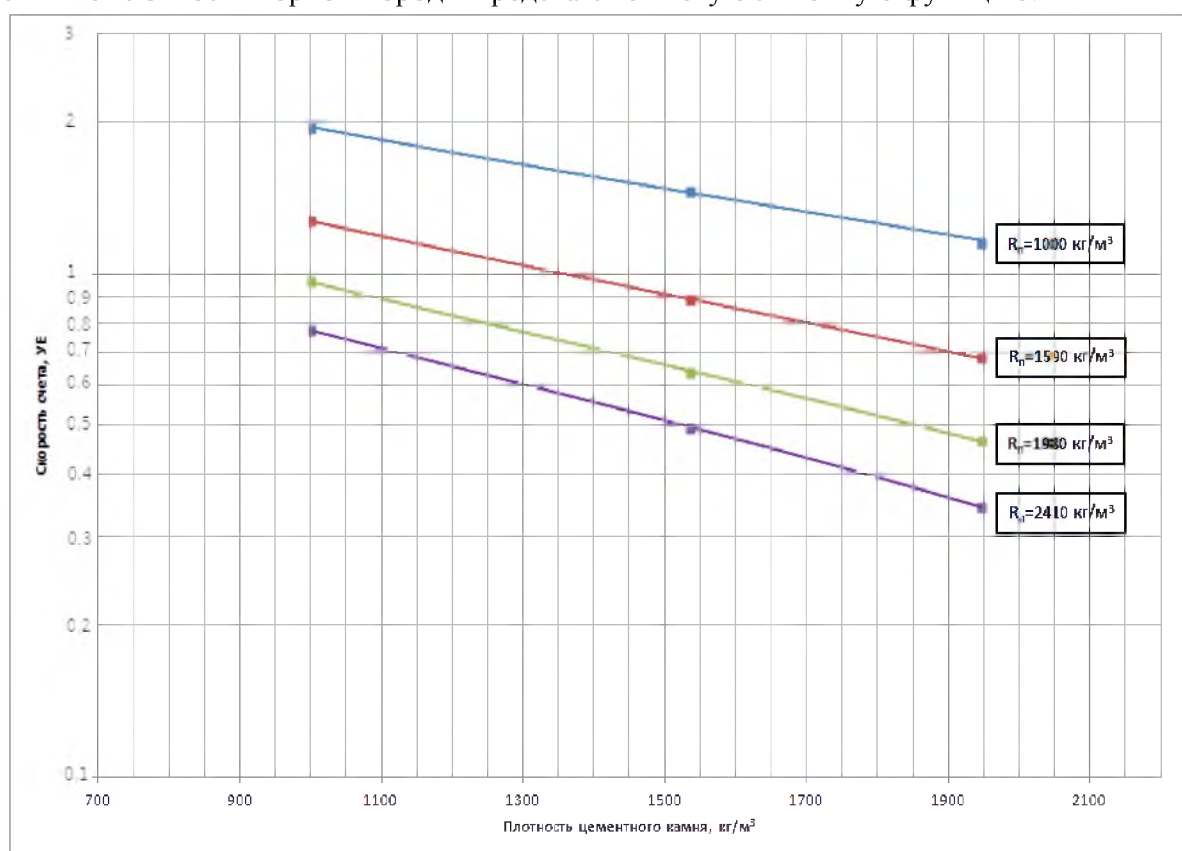


Рис. 6 Сопоставление чувствительности показаний большого зонда к изменению плотности цементного камня и плотности породы.

Основными параметрами, определяемыми по результатам измерений аппаратурой СГДТ являются плотность цементного камня и толщина стенки колонны. Параметров два, соответственно основная зависимость должна содержать две функции преобразования.

Типично основная зависимость для определения толщины стенки обсадной колонны и плотности цементного камня представляет собой систему из двух линейных уравнений:

$$\begin{cases} R_{\text{ц}} = A_1 + B_1 * \text{Ln} \left(\frac{J_{\text{БЗ}}}{J_{\text{ЭТ}}^{\text{БЗ}}} \right) + C_1 * \text{Ln} \left(\frac{J_{\text{МЗ}}}{J_{\text{ЭТ}}^{\text{МЗ}}} \right) \\ H_{\text{к}} = A_2 + B_2 * \text{Ln} \left(\frac{J_{\text{БЗ}}}{J_{\text{ЭТ}}^{\text{БЗ}}} \right) + C_2 * \text{Ln} \left(\frac{J_{\text{МЗ}}}{J_{\text{ЭТ}}^{\text{МЗ}}} \right) \end{cases} \quad (1)$$

где

$\rho_{\text{ц}}$, $H_{\text{к}}$ – плотность цементного камня и толщина стенки соответственно;

$J_{\text{БЗ}}$, $J_{\text{МЗ}}$ – зарегистрированные скорости счета в каналах большого и малого зондов соответственно;

$J_{\text{ЭТ}}$ – скорости счета зарегистрированные в эталонной среде;

A , B , C – коэффициенты, определяемые при градуировке.

В качестве основной зависимости для расчета плотности цемента и толщины стенки обсадной колонны были приняты результаты измерений при плотности породы 2410 кг/м³.

По зависимостям, для расчета толщины стенки обсадной колонны и плотности цементного камня, при плотности породы 2410 кг/м³ были обработаны результаты измерений при других значениях плотности породы 1000, 1590, 1980 кг/м³.

В таблице 4 приведена абсолютная погрешность определения плотности цемента и толщины стенки колонны.

Таблица 4. Погрешность определения плотности цементного камня и толщины стенки колонны.

Нк, мм.	$\rho_{\text{ц}}$, кг/м ³	1000 кг/м ³		1590 кг/м ³		1980 кг/м ³		2410 кг/м ³	
		ИНТ, кг/м ³	ТЛЩ, мм.	ИНТ, кг/м ³	ТЛЩ, мм.	ИНТ, кг/м ³	ТЛЩ, мм.	ИНТ, кг/м ³	ТЛЩ, мм.
7,86	1967	1509	-1,44	812	-0,74	335	-0,27	-16	-0,01
7,85	1947	1691	-1,64	926	-0,79	390	-0,26	-19	0,09
7,74	1000	1338	-1,76	651	-0,73	223	-0,17	-78	0,10
7,82	1535	1525	-1,56	799	-0,77	320	-0,22	-36	0,12
8,83	1963	1722	-1,69	937	-0,85	405	-0,33	19	-0,06
5,83	1967	1667	-1,71	892	-0,84	383	-0,31	12	-0,04
7,74	1000	1327	-1,69					-4	-0,03
7,74	1450	1411	-1,53					28	-0,02
7,74	1847	1469	-1,44					16	-0,05

Из таблицы видно, что при плотности породы 2410 кг/м³ абсолютная погрешность определения плотности цементного камня не превышает 50 кг/м³, а толщины стенки колонны 0,1 мм. При определении параметров колонн, при плотностях породы отличной от плотности 2410 кг/м³, наблюдается систематические ошибки определения плотности цемента и толщины стенки колонны. Ошибка определения параметров цемента и колонн, тем выше чем больше разница между плотностью породы и плотностью цементного камня.

По результатам измерений в центрированных колоннах и в колоннах в которых разница между плотностью породы и плотностью цемента <50 кг/м³ была построена зависимость для

определения поправки позволяющей учесть влияние плотности породы на результаты измерений аппаратурой СГДТ.

Поправка для расчета плотности цемента имеет вид линейной функции, для толщины стенки квадратичный. В общем виде зависимости для расчета плотности цемента и толщины стенки колонны с учетом влияния плотности породы можно записать в виде:

$$\begin{cases} R_{ц} = A_1 + B_1 * \ln\left(\frac{J_{БЗ}}{J_{ЭТ}}\right) + C_1 * \ln\left(\frac{J_{МЗ}}{J_{ЭТ}}\right) + F_1(\rho_{п}) \\ H_{к} = A_2 + B_2 * \ln\left(\frac{J_{БЗ}}{J_{ЭТ}}\right) + C_2 * \ln\left(\frac{J_{МЗ}}{J_{ЭТ}}\right) + F_2(\rho_{п}) \end{cases} \quad (2)$$

где

$\rho_{ц}$, $H_{к}$ – плотность цементного камня и толщина стенки колонны соответственно;

A , B , C – коэффициенты, определяемые при градуировке;

$J_{БЗ}$, $J_{МЗ}$ – скорости счета в каналах большого и малого зондов соответственно;

$F_1(\rho_{п})$, $F_2(\rho_{п})$ – функции учитывающие влияние плотности породы при определении $\rho_{ц}$ и $H_{к}$ соответственно.

В таблице 5 приведены абсолютные погрешности определения плотности цементного камня и толщины стенки колонны полученные с учетом влияния плотности породы.

Таблица 5. Погрешности определения плотности цементного камня и толщины стенки колонны, полученные с учетом влияния плотности породы.

Нк	Rц	1000		1590		1980		2410	
		ИНТ	ТЛЩ	ИНТ	ТЛЩ	ИНТ	ТЛЩ	ИНТ	ТЛЩ
7,86	1967	107	0,18	8	0,00	-73	0,04	13	-0,04
7,85	1947	289	-0,03	123	-0,05	-17	0,05	10	0,06
7,74	1000	-65	-0,14	-153	0,01	-184	0,14	-49	0,07
7,82	1535	123	0,06	-4	-0,02	-87	0,09	-7	0,09
8,83	1963	319	-0,07	134	-0,11	-3	-0,02	48	-0,09
5,83	1967	264	-0,09	88	-0,10	-24	0,00	41	-0,07
7,74	1000	-76	-0,08					25	-0,06
7,74	1450	8	0,09					57	-0,05
7,74	1847	66	0,18					45	-0,07

В результате обработки данных с использованием поправок, полученных выше, погрешности определения плотности цемента и толщины стенки обсадной колонны, в случаях, когда колонна центрирована относительно оси скважины или разница между плотностью цемента и плотностью породы не превышает 50 кг/м³ составляют от 70-100 кг/м³, что практически вдвое лучше допустимой погрешности на аппаратуру СГДТ. Погрешности превышающие допустимые значения наблюдаются в образцах с эксцентричным расположением обсадной колонны.

Как было сказано, учет влияния плотности породы на результаты измерений аппаратурой по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом позволяет повысить точность определения толщины стенки обсадной колонны и плотности цементного камня.

В том случае поправка за влияние плотности породы вносилась, по дополнительным данным, когда плотность породы определялась отдельно, например, аппаратурой плотностного каротажа в открытом стволе скважины. Однако эти данные не всегда доступны.

С целью повышения эффективности параметров, определяемых аппаратурой типа СГДТ, за счет учета влияния плотности породы за одну спускоподъемную операцию, было предложено дополнить стандартную двух зондовую установку аппаратуры СГДТ третьим, дополнительным, зондом, располагающимся за большим зондом.

Для решения этой задачи было проведено математическое моделирование аппаратуры по оценке технического состояния обсаженных скважин, содержащую трех зондовую гамма-гамма установку.

Моделирование работы трех зондовой установки было проведено на базе серийно выпускаемой аппаратуры типа СГДТ-НВ.

Целью моделирования было определение оптимальной длины дополнительного зонда L_3 между источником гамма квантов и детекторами дополнительного зонда, при котором погрешность измерения плотности цементного камня $\Delta\rho_{ц}$ не выходит за пределы допустимых значений при значениях плотности $\rho_{п}$ окружающей горной породы в пределах 1000 – 2410 кг/м³ и при этом обеспечивает достаточную статистическую точность.

В таблице 6 приведены результаты расчетов интенсивности рассеянного гамма – излучения, полученные на различных длинах зондов при различных плотностях породы. Количества импульсов, зарегистрированных детектором NaJ, нормированного на 1 см³ объема детектора и один гамма квант с энергией 662 кэВ источника.

Таблица 6. Результаты расчетов интенсивности рассеянного гамма – излучения для зондов разной длины.

$\rho_{п}$, кг/м ³	$\rho_{ц}$, кг/м ³	Нк, мм.	МЗ	БЗ	Длина дополнительного зонда, мм		
			210	420	540	620	700
2400	1800	8	321,5	6,9	1,955	0,473	0,107
	1800	6	395,3	9,7	2,830	0,697	0,159
	1400	8	310,9	10,1	3,276	0,868	0,225
	1400	6	380,3	14,0	4,690	1,272	0,381
1600	1800	8	312,7	11,1	2,880	1,734	0,580
	1800	6	383,4	15,2	3,939	2,388	0,829
	1400	8	299,4	15,7	4,325	2,677	0,953
	1400	6	364,8	21,4	5,864	3,712	1,328
1000	1800	8	304,4	15,2	7,280	5,570	2,826
	1800	6	304,4	15,2	7,280	5,570	2,826
	1400	8	288,5	20,9	10,210	7,957	4,067
	1400	6	350,4	28,2	13,620	10,829	5,505

По данным, представленным в таблице, была сопоставлена чувствительность большого зонда (БЗ) и дополнительного зонда (при разной длине) к изменению плотности цемента и плотности породы (рисунок 7). При построении диаграмм, данные нормированы на показания в первой строке таблицы 6.

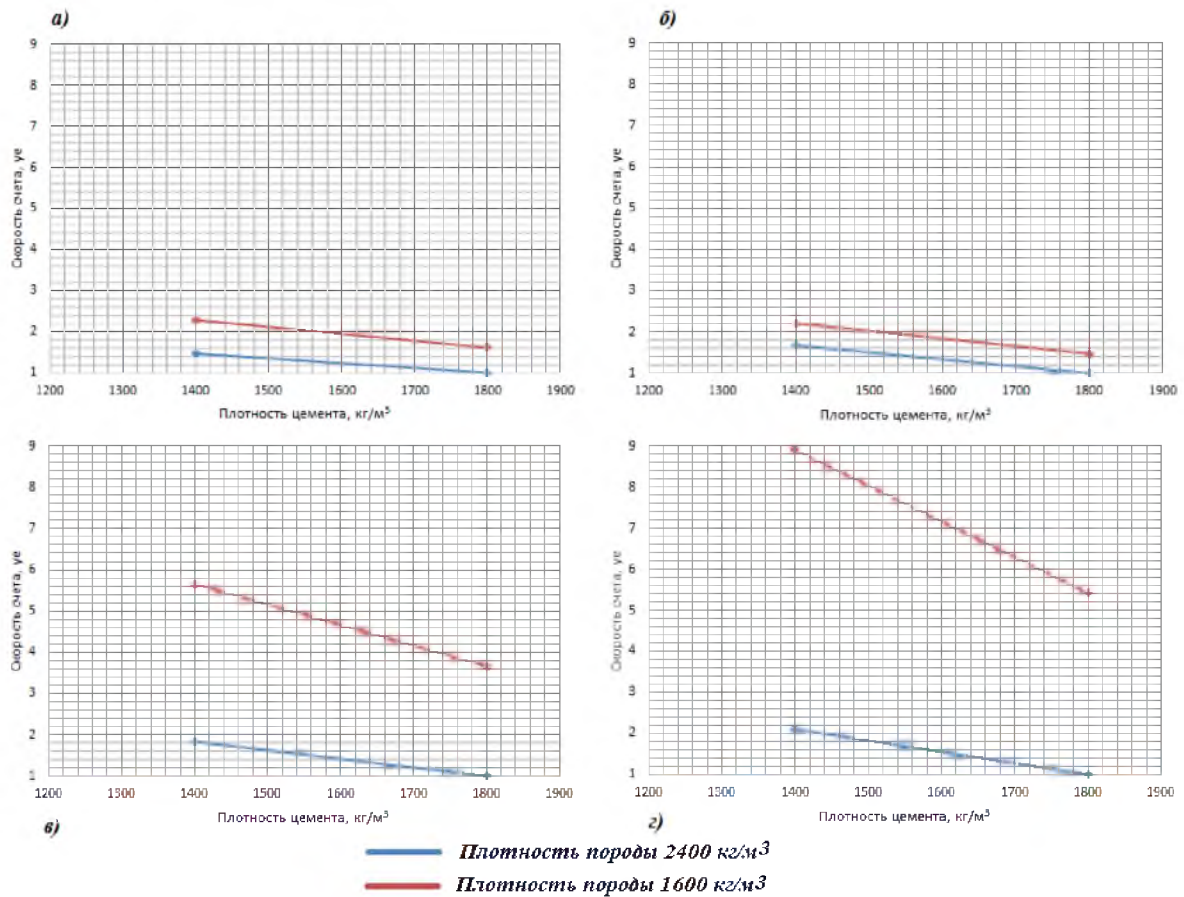


Рис.7 Влияние плотности цемента и плотности породы на зонды разной длины
а) Зонд 420 мм (стандартный БЗ); **б)** зонд 540 мм; **в)** зонд 620 мм;
г) зонд 700 мм.

На рисунке 7а показана чувствительность стандартного большого зонда (БЗ) длиной 420 мм, как уже отмечалось в главе III, его чувствительность к изменению плотности цемента такая же, как и к плотности породы, что говорит о хорошей согласованности экспериментальных и расчетных данных.

Выбор дополнительного зонда длиной 540 мм нецелесообразен т.к. его чувствительность практически не отличается от зонда длиной 420 мм, но при этом статистика меньше в 3,5 раза.

Длина дополнительного зонда 620 мм обеспечивает в двое большую чувствительность к изменению плотности породы относительно чувствительности к плотности цемента, длина зонда 700 мм обеспечивает практически в три раза лучшую чувствительность к плотности породы, при этом статистика при длине зонда 700 мм в 4,5 раза ниже чем при длине 620 мм.

Из проведенного анализа целесообразно принять длину дополнительного зонда L_3 равную 620 мм.

Так же по полученным данным в результате математического моделирования, были получены основные зависимости для расчета плотности цементного камня, толщины стенки обсадной колонны и, в качестве информационного параметра, плотности породы. Основное отличие от зависимости для двух зондовой аппаратуры является введение дополнительных данных полученных с дополнительного зонда, которые позволяют учесть влияние плотности породы на показания большого зонда:

$$\begin{cases} \rho_{\text{ц}} = A_1 + B_1 * \text{Ln} \left(\frac{J_{\text{БЗ}}}{J_{\text{ЭТ}}^{\text{БЗ}}} \right) + C_1 * \text{Ln} \left(\frac{J_{\text{МЗ}}}{J_{\text{ЭТ}}^{\text{МЗ}}} \right) + D_1 * \text{Ln} \left(\frac{J_{\text{ДЗ}}}{J_{\text{ЭТ}}^{\text{ДЗ}}} \right) \\ H_{\text{к}} = A_2 + B_2 * \text{Ln} \left(\frac{J_{\text{БЗ}}}{J_{\text{ЭТ}}^{\text{БЗ}}} \right) + C_2 * \text{Ln} \left(\frac{J_{\text{МЗ}}}{J_{\text{ЭТ}}^{\text{МЗ}}} \right) + D_2 * \text{Ln} \left(\frac{J_{\text{ДЗ}}}{J_{\text{ЭТ}}^{\text{ДЗ}}} \right) \\ \rho_{\text{п}} = A_3 + B_3 * \text{Ln} \left(\frac{J_{\text{БЗ}}}{J_{\text{ЭТ}}^{\text{БЗ}}} \right) + C_3 * \text{Ln} \left(\frac{J_{\text{МЗ}}}{J_{\text{ЭТ}}^{\text{МЗ}}} \right) + D_3 * \text{Ln} \left(\frac{J_{\text{ДЗ}}}{J_{\text{ЭТ}}^{\text{ДЗ}}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

где

$\rho_{\text{ц}}$, $H_{\text{к}}$, $\rho_{\text{п}}$ – плотность цементного камня, толщина стенки колонны и плотность породы соответственно;

A , B , C , D – коэффициенты, определяемые при градуировке;

$J_{\text{БЗ}}$, $J_{\text{МЗ}}$, $J_{\text{ДЗ}}$ – скорости счета в каналах большого, малого и дополнительного зондов соответственно;

Для каждой длины зонда была решена система уравнений (3) и получены соответствующие коэффициенты A , B , C , D .

По результатам расчета плотности цементного камня и толщины стенки колонны с применением дополнительного зонда, установлено, что при длине дополнительного зонда 620мм погрешности определения плотности цементного камня и толщины стенки минимальны.

Таким образом по результатам математического моделирования трех зондовой аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом оптимальная длина дополнительного зонда L_3 рекомендуется 620 мм.

На основании результатов математического моделирования в Центре метрологии и сертификации ООО «Газпром георесурс» был сконструирован полномасштабный макет трех зондового скважинного прибора по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом.

Макетом трехзондового прибора были проведены измерения во всех колоннах калибровочной установки для аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин при плотности породы 1000 - 2410 кг/м³. Для снижения статистической погрешность данные с детекторов дополнительного зонда суммировались.

По результатам измерений в калибровочной установке была проведена оценка чувствительности дополнительного зонда макетного трехзондового прибора (рисунок 8). С целью сопоставления экспериментальных результатов с результатами математического моделирования на рисунок добавлены расчетные данные.

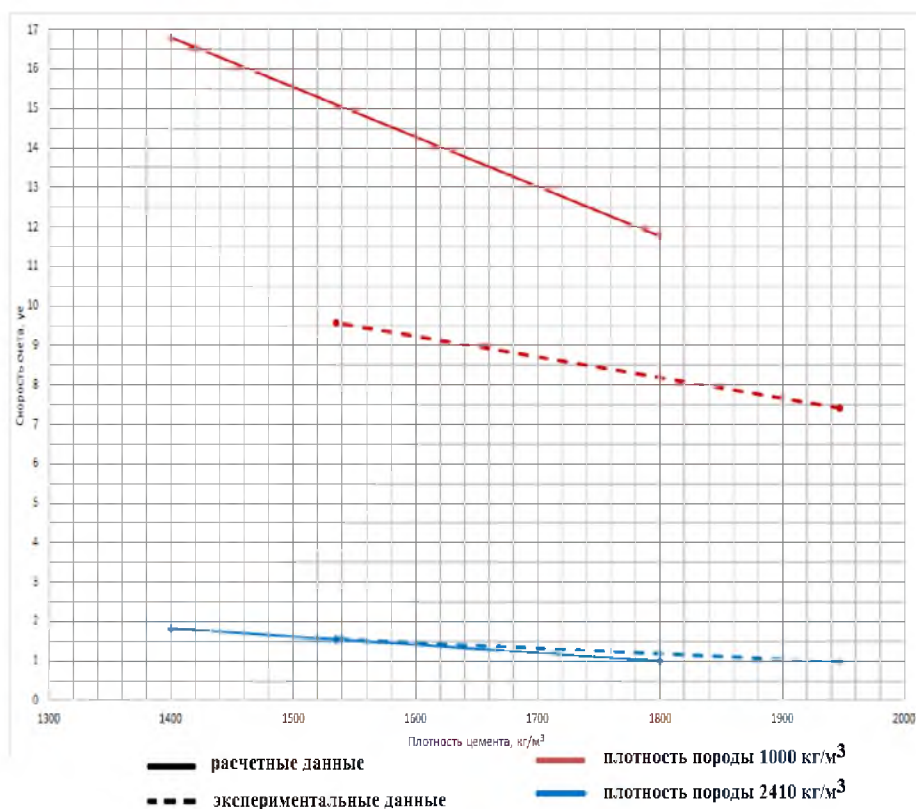


Рис.8 Сопоставление чувствительности дополнительного зонда полученной по расчетным и экспериментальным данным

Из рисунка видно, что чувствительность дополнительного зонда макетного образца трехзондовой аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин к изменению плотности цемента довольно хорошо согласуется с расчетными данными. Чувствительность к изменению плотности породы немного занижена относительно расчетных данных, это может быть связано с не полным учетом всех влияющих факторов при вводе данных в математическую модель.

С целью подтверждения работоспособности макетного образца, по результатам измерения в эталонных обсадных колоннах калибровочной установки для аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом были определены коэффициенты для системы уравнений (4) и проведены контрольные замеры в скважине на одном из подземных хранилищ газа центральной России. Эта скважина примечательна тем, что в ней не проводился плотностной гамма-гамма каротаж и соответственно отсутствуют какие-либо данные о плотности породы. На рисунке 9. приведен наиболее яркий фрагмент каротажной диаграммы, характеризующий плотность цементного камня по стволу скважины, по которым можно судить о преимуществах трехзондовой аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин. На левом поле, рисунка, продемонстрированы результаты измерения стандартной двухзондовой аппаратурой, на правой - макетом трехзондовой аппаратуры. Красная линия соответствует номинальной плотности цементного камня, известной по данным по заливке цемента, черные линии соответствуют максимально допустимой погрешности определения плотности цемента $\pm 150 \text{ кг/м}^3$.

Из рисунка видно, что плотность породы оказывает систематическое влияние на определение плотности цементного камня на все шесть детекторов при измерении стандартной, двухзондовой аппаратурой СГДТ (левое поле). В некоторых интервалах глубин ошибка

определения плотности цементного камня достигает 600 кг/м^3 , что практически в трижды превышает допустимую погрешность. По этой диаграмме можно лишь на качественном уровне судить о качестве цементирования колонны и о плотности самого цементного камня.

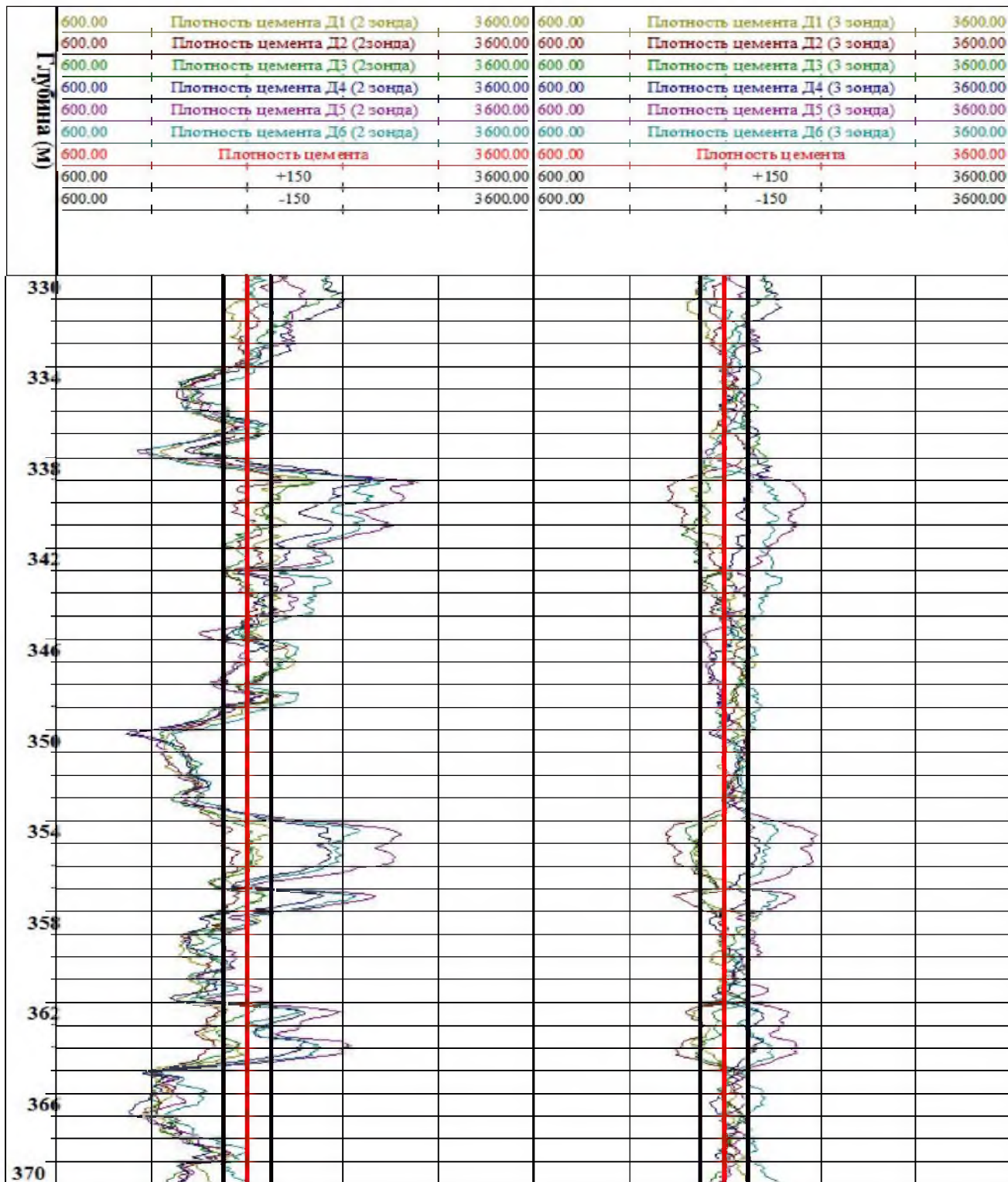


Рис. 9. Сравнение результатов определения плотности цементного камня в газовой скважине, полученной двухзондовой и трехзондовой аппаратурой. Интервал глубин 330- 370 м.

На правом поле приведенных диаграмм показано определение плотности цементного камня макетным образцом трехзондовой аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин. Из диаграмм видно, что практически во всех интервалах плотность цементного камня, определенная по шести детекторам, не превышает допустимую погрешность ± 150 кг/м³. В интервалах где кривые выходят за допустимый коридор погрешностей, говорит либо о эксцентриситете колонны, либо о не качественной заливке цемента.

Учитывая это, можно сделать следующий вывод: использование трех зондовой аппаратуры по оценке технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом позволяет повысить эффективность проведения работ, а также вывести интерпретацию гамма-гамма цементометрии с качественного уровня на количественный, без привлечения дополнительных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании проведенных исследований изложены новые научно обоснованные методические и технические решения по повышению эффективности метрологического обеспечения скважинной геофизической аппаратуры гамма-гамма каротажа нефтегазовых скважин, позволяющие вывести интерпретацию скважинных измерений, этим методом, на новый уровень.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. В качестве первичного эталона геофизических параметров плотности и эффективного атомного номера используется комплект стандартных образцов позволяющий проводить калибровку и градуировку плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа с учетом влияния, указанных параметров, друг на друга.
2. Разработан и внедрен комплект стандартных образцов в виде насыщенной модели пласта, позволяющее за одну операцию проводить измерение трех значений плотности породы и эффективного атомного номера. Который позволяет снизить стоимость изготовления образцов, снизить весогабаритные характеристики и уменьшить радиационную нагрузку на персонал.
3. Использование при калибровке аппаратуры плотностного и литоплотностного каротажа методики, предписывающей получение нормирующего множителя по совокупности всех образцов используемых при калибровке аппаратуры, позволяет повысить точность определения плотности и эффективного атомного номера горных пород в процессе обработки результатов скважинных измерений.
4. Полученные зависимости для учета влияния плотности породы на результаты измерения аппаратурой типа СГДТ с использованием калибровочной установки для аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом, позволяют повысить точность определения параметров цемента и обсадной колонны, до такой точности, с какой определена плотность породы.
5. Разработанная конструкция трехзондового прибора по контролю технического состояния обсаженных скважин позволяет определять параметры цемента и обсадной колонны с учетом влияния плотности породы за одну спускоподъемную операцию без привлечения дополнительных данных.

**Научные работы, опубликованные в рецензируемых научных журналах,
входящих в перечень ВАК**

1. Е.В. Громов, **В.В. Первушин**, В.Г. Цейтлин. Метрологическое обеспечение плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа// НТВ Каротажник – 2014. – № 11(245). – С 70-76.
2. Е.В. Громов, **В.В. Первушин**, В.Л. Плотников, В.Г. Цейтлин и др. Количественное определение технического состояния обсаженных скважин аппаратурой типа СГДТ// НТВ Каротажник – 2016. – №5(263). – С 87-100

Научные работы, опубликованные в других журналах

1. Е.В. Громов, **В.В. Первушин**, В.Г. Цейтлин. Метрологическое обеспечение литоплотностного гамма-гамма каротажа// Тезисы докладов. Юбилейная XX НПК «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин» Уфа – 2014. С 114-119.
2. Е.В. Громов, **В.В. Первушин**, В.Г. Цейтлин. и др. Особенности градуировки аппаратуры СГДТ-НВ// Тезисы докладов. XXI НПК «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин» Уфа – 2015. С 53-60.

Патенты

1. Патент на изобретение №2436949 С1 Российская Федерация, МПК E21B47/00, G01V13/00, G01V5/12. Калибровочная установка/ Н.В. Алексеев, С.А. Венско, Е.В. Громов, В.В. Илюшин, В.Г. Цейтлин, **В.В. Первушин**, В.П. Цирульников; патентообладатель ООО «Георесурс» – заявка №2009138150/03 от 16.10.2009; опубл. 20.12.2011 Бюл. №35.
2. Патент на изобретение № 2539050 С1 Российская Федерация, МПК G01V13/00, G01V5/12. Устройство для калибровки скважинной аппаратуры/ Е.В. Громов, В.Г. Цейтлин, **В.В. Первушин**; патентообладатель ООО «Газпром георесурс» – заявка №2013137780/13 от 13.08.2013; опубл. 10.01.2015 Бюл. №1.
3. Патент на полезную модель №90576 U1 Российская Федерация, МПК G01V13/00. Калибровочная установка/ Н.В. Алексеев, С.А. Венско, Е.В. Громов, В.В. Илюшин, В.Г. Цейтлин, **В.В. Первушин**, В.П. Цирульников; патентообладатель ООО «Газпром геофизика» – заявка №2009138153/22 от 16.10.2009; опубл. 10.01.2010.
4. Патент на полезную модель № 136196 U1 Российская Федерация, МПК G01V5/12. Устройство для калибровки скважинной аппаратуры/ Е.В. Громов, В.Г. Цейтлин, **В.В. Первушин**; патентообладатель ООО «Газпром георесурс» – заявка №2013137778/28 от 13.08.2013; опубл. 27.12.2013.
5. Патент на полезную модель № 136486 U1 Российская Федерация, МПК E21V47/00, G01V5/12. Устройство для калибровки скважинной аппаратуры/ Е.В. Громов, В.Г. Цейтлин, **В.В. Первушин**; патентообладатель ООО «Газпром георесурс» – заявка №2013137779/28 от 13.08.2013; опубл. 10.01.2014.
6. Патент на полезную модель № 157298 U1 Российская Федерация, МПК G01V13/00. Устройство для тестирования скважинной геофизической аппаратуры определения технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом/ В.Ю. Хатьков, В.Л. Плотников, **В.В. Первушин**, Е.В. Громов, В.Г. Цейтлин; патентообладатель ООО «Газпром георесурс» - заявка № 2015126160/28(040631) от 30.06.2015