

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»

Диссертация на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

д.г-м.н. Талалай А.Г.

Москва – 2017 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АППАРАТУРЫ ГАММА-ГАММА КАРОТАЖА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН	13
1.1. Аппаратура гамма-гамма каротажа для открытого ствола нефтяных и газовых скважин и ее метрологическое обеспечение	13
1.2. Аппаратура по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом и ее метрологическое обеспечение	21
1.3. Задачи исследований. Обоснование основных требований к метрологическому обеспечению аппаратуры гамма-гамма каротажа нефтяных и газовых скважин	27
2. РАЗРАБОТКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АППАРАТУРЫ ПЛОТНОСТНОГО И ЛИТОПЛОТНОСТНОГО ГАММА-ГАММА КАРОТАЖА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН	30
2.1. Обоснование конструкции и свойств первичных эталонов геофизических параметров для аппаратуры плотностного и литоплотностного каротажа, выполненных в виде моделей пластов, пересеченных скважиной	30
2.2. Методика разработки и изготовления стандартных образцов.	31
2.2.1. Изготовление стандартных образцов плотности и эффективного атомного номера СОГГК-ЛП-1 и СОГГК-ЛП-2	32
2.2.2. Изготовление стандартного образца плотности и эффективного атомного номера СОГГК-ЛП-3	32
2.2.3. Изготовление стандартного образца плотности и эффективного атомного номера СОГГК-ЛП-4	33
2.2.4. Изготовление стандартного образца плотности и эффективного атомного номера СОГГК-ЛП-5	33
2.2.5. Изготовление стандартных образцов плотности и эффективного атомного номера СОГГК-ЛП-6 и СОГГК-ЛП-7	34
2.2.6. Изготовление стандартных образцов плотности и эффективного атомного номера СОГГК-ЛП-8 и СОГГ-ЛП-9	34
2.3. Расчет аттестованных значений стандартных образцов и погрешности аттестованного значения	35
2.3.1. Определение параметров монолитных стандартных образцов	36
2.3.2. Определение параметров насыпных стандартных образцов	38
2.4. Исследование неоднородности стандартных образцов	39
2.5. Проведение измерений в стандартных образцах плотности	41
2.6. Построение функции преобразования для определения плотности горных пород, двухзондовой аппаратурой плотностного гамма-гамма каротажа	42
2.7. Построение функции преобразования для определения эффективного атомного номера горных пород аппаратурой литоплотностного гамма-гамма каротажа	46
2.8. Оценка влияния геометрии стандартных образцов на результаты измерений аппаратурой плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа	50

2.9. Повышение эффективности метрологического обеспечения аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа.....	52
Выводы по главе 2	56
3. РАЗРАБОТКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АППАРАТУРЫ ПО ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБСАЖЕННЫХ СКВАЖИН ГАММА-ГАММА МЕТОДОМ	57
3.1. Особенности конструкции метрологической установки для аппаратуры контроля технического состояния обсаженных нефтяных и газовых скважин	57
3.1.1. Подготовка установки к измерениям и проведение измерений.....	64
3.2. Исследование влияния различных факторов на показания аппаратуры СГДТ-НВ ..	67
3.3. Построение функции преобразования для расчета толщины стенки обсадной колонны и плотности заколонного пространства	74
3.3.1. Расчет поправки вызванной влиянием плотности породы	77
3.4. Исследование эксцентричности колонны относительно оси скважины по результатам измерений аппаратурой типа СГДТ	80
3.5. Разработка вторичных эталонов геофизических параметров для аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных нефтяных и газовых скважин	86
3.6. Устройство для тестирования аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом	88
3.7. Повышение эффективности геофизических исследований при контроле технического состояния обсаженных нефтяных и газовых скважин гамма-гамма методом	90
Выводы по главе 3	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	110
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	112
ЛИТЕРАТУРА	113

ВВЕДЕНИЕ

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., Баэмбитов 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 УралГеоГ.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 спускопереводную 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 спускопереводную 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 помошь в написании диссертации.

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

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АППАРАТУРЫ ГАММА-ГАММА КАРОТАЖА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

Согласно [1] гамм-гамма метод в зависимости от области его применения можно условно подразделить на полевую, рудничную и скважинную модификации.

Применительно к исследованию скважин, в том числе, нефтяных и газовых, гамма-гамма метод получил название плотностного гамма-гамма каротажа (ГГК-П). Наличие однозначной зависимости между пористостью и плотностью, а также достаточно высокая стабильность плотностных характеристик различных разновидностей осадочных пород, присущих тому или иному месторождению, позволили довольно четко решать задачи по уточнению литологических разрезов и определению пористости осадочных пород с помощью ГГК-П [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Одно из направлений ГГК-П применительно к нефтяным и газовым скважинам является литоплотностной гамма-гамма каротаж (ГГК-ЛП), позволяющий, по мимо плотности горных пород, определять и эффективный атомный номер горных пород $Z_{\text{эфф}}$.

В обсаженных и зацементированных скважинах гамма-гамма каротаж применяется для определения толщины стенки обсадной колонны, высоты подъема цемента за колонной и качества цементирования продуктивных интервалов [11, 12, 13, 14, 15, 16].

1.1. Аппаратура гамма-гамма каротажа для открытого ствола нефтяных и газовых скважин и ее метрологическое обеспечение

Как уже отмечалось [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10], гамма-гамма каротаж основан на регистрации рассеянного гамма-излучения, создаваемого ампульным источником гамма-квантов (в России самый распространенный является изотоп Cs-137 с энергией 662 кэВ). Проходя через породу, скважину и стальной корпус прибора, гамма-кванты частично взаимодействуют со средой и поглощаются, частично рассеиваются с потерей энергии. В результате, на детектор поступают гамма-кванты, энергетический спектр которых существенно отличается от первичного

спектра. Энергия, выделенная гамма-квантом в детекторе, преобразуется блоком детектирования в электрический импульс, заряд которого пропорционален выделенной энергии гамма-кванта в детекторе.

Основные задачи, решаемые плотностным и литоплотностным гамма-гамма каротажем в нефтегазовых скважинах [17, 18]:

- определение коэффициента пористости и его уточнение с учетом литологических особенностей около скважинных пород коллекторов нефти и газа.

Плотностной гамма-гамма каротаж (ГГК-П) применяют для измерения объемной плотности $\rho_{об}$ горных пород [19]. С этой целью регистрируют гамма-кванты, испущенные источником гамма-квантов и рассеянные горными породами. Для исключения влияния на показания ГГК-П вещественного состава пород регистрируется гамма-излучение в диапазоне энергий 150-2000 кэВ претерпевшего комптоновское рассеяние [20, 21, 22, 23, 24, 9, 10]. В этом случае показания ГГК-П определяются непосредственно числом электронов в единице объема вещества (электронная плотность ρ_e), которая связана с объемной плотностью соотношением [25, 26, 27]:

$$\rho_e = \rho_{об} \times N \times \frac{Z}{A}, \text{ где} \quad (1)$$

N – Число Авогадро; Z – атомный номер элемента, входящего в состав вещества; A – атомный вес вещества.

Поскольку N – константа, Z/A для большинства легких породообразующих минералов равно 0,5 и лишь для водорода равно 1. Суммарное сечение энергий гамма-квантов, регистрируемых при плотностном каротаже, при постоянном соотношении Z/A будет зависеть только от объемной плотности вещества [27].

Показания приборов плотностного гамма-гамма каротажа в произвольной среде будут такими же, как и в другой среде в том случае, если равны их электронные плотности [9, 22, 28]. В качестве эталонной среды при обработке показаний ГГК-П

принят водонасыщенный известняк (кальцит). В этом случае электронная плотность равна истинной объемной плотности. Для всех других пород, с отличным литотипом и при ином характере насыщения, измеряемое значение плотности будет отличаться от истинного. Для этого дополнительно введено понятие эквивалентной плотности $\rho_{\text{экв}}$. Эта величина необходима для приведения измеренных при ГГК-П значений плотности к плотности водонасыщенного известняка. Соотношение эквивалентной и объемной плотности имеет вид [26, 27]:

$$\rho_{\text{экв}} = 2.141 \times \rho_{\text{об}} \times \frac{Z}{A} - 188 \text{ [кг/м}^3\text{]} \quad (2)$$

Для большинства типов пород коллекторов нефти и газа эквивалентная плотность $\rho_{\text{экв}}$ с погрешностью, не превышающей $\pm 0,02 \text{ г/см}^3$, равна объемной плотности пород [26, 27].

Количественное определение плотности и пористости горных пород в нефтяных и газовых скважинах осуществляется, в основном, двухзондовой аппаратурой плотностного гамма-гамма каротажа [29]. Совместная обработка показаний зондов таких приборов обеспечивает исключение влияния промежуточной среды благодаря существенно различной чувствительности их к изменению плотности пород, но близкой чувствительности к промежуточной среде [30].

В карбонатных разрезах, из-за влияния литологии на определение пористости, проводятся измерения литоплотностного гамма-гамма каротажа (ГГК-ЛП), который позволяет регистрировать рассеянные гамма-кванты с низкой энергией менее 100 кэВ (фотоэффект), зависящие от эффективного атомного номера среды $Z_{\text{эфф}}$ [22, 31, 32, 33]. Значение эффективного атомного номера сред, состоящих из нескольких элементов, определяется расчетным путем исходя из состава среды по формуле [34]:

$$Z_{\text{эфф}} = \sqrt[n]{\sum_{i=1}^k q_i \times Z_i^n}, \text{ где} \quad (3)$$

q_i – весовое содержание компонентов состава с атомным номером Z_i .

Для интервала энергий, используемых в литоплотностном каротаже, показатель степени n принимается равным 3,6 [67].

Так же, по мимо эффективного атомного номера, заряд среды может характеризоваться, так называемым, индексом фотоэлектрического поглощения Pe , который пропорционален сечению фотоэффекта на электрон и рассчитывается по формуле [67, 68, 69, 70]:

$$Pe = \left(\frac{Z_{\text{эфф}}}{10} \right)^{3,6} \quad (4)$$

Благодаря работам Воскобойникова Г.М., Уткина В.И., Гулина Ю.А., Соколова Ю.И., Ведехина А.Ф. в 1950-1960 г. было предложено проводить ГГК-П с прижимным коллимированным измерительным зондом, плотно прижимающимся к стенке скважины [35, 36].

Первые скважинные приборы гамма-гамма каротажа ГГК-057 и ГГК-057М, содержащие однозондовые установки ГГК, были выпущены в середине XX века небольшими партиями [36]. Прибор состоял из корпуса с системой прижимных рычагов и электронной схемы с индикатором излучения, расположенных в корпусе и зондовой части. Корпус представляет собой стальную трубу диаметром 71 мм и толщиной стенки 7мм, несущую пару неравноплечих рычагов, обеспечивающих прижение прибора к стенке скважины. Нижняя часть трубы заканчивается патрубком под разрядный счетчик, являющийся индикатором рассеянного гамма излучения, счетчик заключен в свинцовый экран, имеющий в сечении форму эллипса. В экране напротив индикатора расположено окно, в нижней части экрана размещен источник гамма квантов, против которого также находится окно. Излучение источника слабо коллимировано под средним углом 60°, регистрируемое излучение не коллимировано. Длина зонда составляет 35 см [22].

Широкое применение однозондовых приборов ограничивалось отсутствием возможности исключения влияния ближней зоны. Глинистая корка толщиной 1 см изменяет показания так же, как уменьшение плотности на 150 кг/м³.

Эта проблема была решена после внедрения в 1969 году двухзондовой аппаратуры плотностного гамма – гамма каротажа. Наиболее распространенные приборы РГП-1, РГП-2, СГП2-АГАТ и др. Зондовая часть этих приборов практически не отличается друг от друга (рисунок 1.1). В отличии от однозондовой аппаратуры излучение от источника и регистрируемое излучение коллимированы. Для коллимации и защиты индикаторов от прямого фона источника применены экраны из псевдосплава вольфрама с медью плотностью 1850 кг/м³. С целью исключения влияния состава пород для каждого из зондов индивидуально подбирались пороги дискриминации излучения[22].

Технические характеристики аппаратуры подробно описаны в работах [25, 37]. Относительная дифференциация показания в отношении показаний в пластах с объемной плотностью 2000 кг/м³ и 2700 кг/м³ по каналу большого зонда – 3,5, по каналу малого зонда 1,3. Погрешность определения плотности ±30-50 кг/м³. Максимальный диаметр аппаратуры 140 мм, длина 3400 мм.

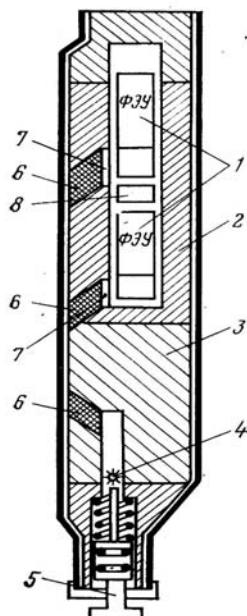


Рис. 1.1. Конструкция зондовой части РГП-2 [29]

- 1- Сцинтилляционные счетчики; 2 – экраны из W; 3,8 – экраны из Pb; 4 – источник; 5 – гидравлическое реле; 6 – коллимационные окна; 7 – синцово-кадмиеевые экраны детекторов.

Основной метрологической характеристикой аппаратуры ГГК-П является основная погрешность измерения плотности в измеряемом диапазоне.

Метрологические характеристики аппаратуры определяют следующие основные параметры [26]:

- длина зонда и расстояние между детекторами;
- параметры коллимационных каналов для источника гамма-квантов и детекторов излучений;
- тип и размер фильтра на детекторах гамма-квантов;
- тип и активность источников гамма-квантов;
- энергия регистрируемого гамма-излучения.

Оптимизация этих параметров осуществляется на стадии разработки аппаратуры и, при метрологическом сопровождении, фактически постоянны.

Переход от зарегистрированных показаний ГГК к физическим параметрам производится путем их сравнения с показаниями в средах с известными свойствами. Для исключения влияния изменений активности источника, эффективности индикаторов и небольших вариаций геометрии зонда используются не сами показания, а их отношение к показаниям в эталонной среде [22]. В работе [22] рассмотрено несколько конструкций калибровочных устройств, в частности для прижимных приборов с азимутальной коллимацией излучения рассматриваются стандартные образцы в форме полупластов с известной плотностью.

Полупласт представляет собой блок из материала с известной плотностью. Размеры блока выбираются исходя из параметров зонда, определяющих глубинность исследований. В верхней части блока по его длине делается выемка по форме зондовой части прибора. Одни из первых полупластов были предложены и опробованы в 1959-1963 г. [36].

Позже применительно к аппаратуре ГГК-П были разработаны Государственные стандартные образцы плотности (ГСО-ПНС), выполненные в виде полупластов. [38, 39]

Комплект ГСО-ПНС включает четыре стандартных образца (рисунок 1.2), три из которых изготовлены из монолитных материалов, сплава алюминия АД-0, магниевого сплава, и монолитного коэлгинского мрамора, четвертый образец

изготовлен из пришлифованных друг к другу пластин алюминия и магния (Таблица 1). Стандартные образцы обеспечивают калибровку прижимной и экранированной аппаратуры ГГКП типа РГП-2, СГП2-АГАТ, РКС-1 и другой аналогичной аппаратуры с диаметром зондовой части порядка 120 мм.

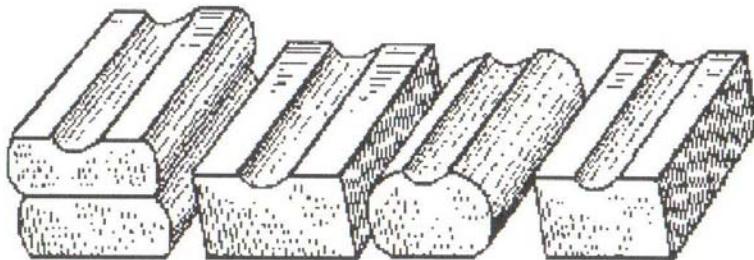


Рисунок 1.2. Государственные стандартные образцы плотности [26]

Таблица 1. Метрологические характеристики комплекта ГСО-ПНС.

Шифр ГСО	Материал ГСО	Тип образца	Габариты, м	ρ , кг/м ³
ГСО-ПНС1	Al AD-0	Монолитный	0,65×0,4×0,25	2594
ГСО-ПНС2	Mg сплав	Монолитный	0,74×0,25	1727
ГСО-ПНС3	Листы Mg и Al	Гетерогенный	0,70×0,37×0,25	2119
ГСО-ПНС4	CaCO ₃	Монолитный	0,65×0,42×0,25	2701

Для этой аппаратуры габаритные размеры стандартных образцов исключают ощутимое влияние краевых эффектов на показания ГГК-П. Комплект ГСО-ПНС воспроизводит три значения плотности, соответствующие двум крайним и среднему значению измеряемого диапазона плотности горных пород в разрезах нефтяных и газовых скважин.

ГСО-ПНС в комплексе со стандартными образцами плотности предприятия ООО «Нефтегазгеофизика» были использованы для градуировки современной аппаратуры литоплотностного гамма-гамма каротажа. Значения эффективного атомного номера для них рассчитывались из химического состава по формуле 3. Характеристики образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Метрологические характеристики моделей плотности и индекса фотоэлектрического поглощения.

№ модели	Состав модели	$\rho, \text{ кг}/\text{м}^3$	$Z_{\text{эфф.}}$
ГСО 1	Al марки АДО	2594	13,12
ГСО 2	Al+Mg	2119	13,12
ГСО 3	Мрамор	2703	15,71
ГСО 4	Mg марки МА-14	1730	16,14
СОП 1	Al+Ti	2910	17,14
СОП 2	Al марки В-95	2720	16,82
СОП 3	Mg+Ti	2060	17,00

Постоянно растущие темпы строительства скважин так же отразились и на времени, отведенного на геофизические исследования, что, в свою очередь, потребовало от разработчиков скважинной геофизической аппаратуры разработки новой аппаратуры, позволяющей проводить работы через буровой инструмент.

Учитывая это требование, современная скважинная геофизическая аппаратура, в том числе, и аппаратура ГГК-П была разработана в диаметре 73-76 мм. Уменьшение диаметра аппаратуры ГГК-П стало возможным, в том числе, и за счет ослабления экранировки детекторов с тыльной стороны прибора.

При проведении измерений в скважинах с аппаратурой диаметром 73-76 мм, прошедшей калибровку на стандартных образцах в виде полупластов, были выявлены систематические расхождения по сравнению к измерениям выполненными аппаратурой диаметром больше 90мм.

Этот эффект вызван тем, что калибровка аппаратуры ГГК-П на стандартных образцах в виде полупластов проводится в воздушной среде и при отсутствииной экранировки детекторов с тыльной стороны, при этом на детекторы, наряду с рассеянными гамма-квантами, попадают гамма-кванты, распространяющиеся вдоль прибора с его тыльной стороны, что приводит к возникновению дополнительной систематической ошибки.

Для исключения этой ошибки, целесообразно проводить калибровку аппаратуры ГГК-П в стандартных образцах плотности, выполненных в виде моделей пластов, пересеченных скважиной.

В 2006 г. В Центре Метрологии и Сертификации ОАО «Газпромгеофизика» были построены стандартные образцы плотности (СОП) в виде насыщенных моделей пластов, пересеченных скважиной. Габаритные размеры стандартных образцов $\varnothing 1000 \times 850$ мм, диаметр скважины $\varnothing 200$ мм, которые обеспечивают регистрацию не менее 99% рассеянного гамма-излучения. Комплект СОП включает пять образцов.

Характеристики образцов рассчитывались исходя из их вещественного 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%.

Практически в это же время в ГУП ЦМИ «УралГео» закончили изготовление стандартных образцов пористости и плотности горных пород, представляющие собой также объемные модели пластов, пересеченные скважиной [40, 41, 42].

Метрологическое обеспечение аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа используемое в зарубежных геофизических компаниях не отличается от метрологического обеспечения, используемого в России.

Однако, из-за больших габаритов стандартных образцов плотности, многие геофизические компании продолжают использовать стандартные образцы в виде полупластов, пренебрегая возникающими при этом ошибками.

1.2. Аппаратура по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом и ее метрологическое обеспечение

Различие плотностей разных составляющих сред, заполняющих ствол скважины (обсадная колонна, цементный камень, промывочная жидкость, газ), позволяет использовать ГГК-П для контроля технического состояния обсаженных скважин [15, 29, 43]:

- определение высоты подъема и равномерности распределения цемента за колонной;
- определение плотности среды, заполняющей ствол скважины;
- определение толщины стенки обсадной колонны.

Одним из самых распространенных видов аппаратуры, решающей эту задачу, является двухзондовая аппаратура скважинной гамма дефектоскопии, толщинометрии (СГДТ) и цементометрии (ЦМ) [44].

Принципиально современная аппаратура плотностного гамма-гамма каротажа отличается от аппаратуры, разработанной в середине XX века, только лишь диаметром. Одним из основных требований к аппаратуре, выпускаемой в настоящее время, является возможность доставки приборов в интервал исследования через буровой инструмент. Это условие ограничивает максимальный диаметр скважинной геофизической аппаратуры для работы в открытом стволе скважин до 76 мм. При этом метрологические характеристики должны сохраниться.

Аппаратура для оценки технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом имеет несколько принципиальных отличий от аппаратуры, предназначеннной для работы в открытом стволе. Скважинные приборы по контролю технического состояния обсаженных скважин необходимо центрировать относительно оси обсадной колонны, так как при оценке качества цемента необходимо исследовать скважины в сканирующем режиме по всему азимуту. Для решения этой задачи в первых приборах устанавливался вращающийся вокруг оси прибора детектор. В более современной аппаратуре устанавливались шесть детекторов, размещенных равномерно по азимуту прибора, но опрос детекторов проводился по очереди. При этом в первом и во втором случае каротажные кривые выглядели в виде синусоиды [25, 45].

После внедрения цифровой аппаратуры появилась возможность проводить регистрацию данных с каждого детектора отдельно. Самыми распространенными отечественными приборами по контролю технического состояния обсаженных скважин являются такие приборы, как СГДТ-2, СГДТ-3, СГДТ-НВ, СГДТ-100,

СГДТ-100М, ЦМ8-12. За рубежом контроль качества цементирования обсадных колонн гамма-гамма методом не получил должного развития.

Аппаратура типа СГДТ предназначена для контроля методом радиометрии качества цементирования и технического состояния обсадных колонн в нефтегазовых скважинах и «привязки» результатов измерений и муфт обсадной колонны к геологическому разрезу и к апсидальной плоскости скважины. Зарегистрированные прибором данные позволяют определить плотность вещества в заколонном пространстве и толщины стенки труб обсадной колонны в сканирующем режиме. Прибор рассчитан для проведения измерений в нефтегазовых скважинах с заполнением растворами с плотностью от 1000 до 1400 кг/м³ [44, 46].

Диапазон измерения:

- толщины стенки труб обсадной колонны от 5 до 12 мм;
- плотности цементного камня от 1000 до 2000 кг/м³.

Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности прибора при измерении:

- плотности вещества в заколонном пространстве ± 150 кг/м³;
- толщины стенки труб обсадной колонны $\pm 0,5$ мм.

Современная аппаратура по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом содержит два зонда (рисунок 1.3.) длиной ~200 и ~400 мм, предназначенные для регистрации рассеянного гамма-излучения от источника гамма-квантов. Малый зонд содержит один сцинтилляционный детектор, расположенный по оси прибора и коллимированный в осевом направлении. Большой зонд может состоять из трех, шести или восьми сцинтилляционных детекторов, в зависимости от конкретной марки аппаратуры, расположенных равномерно в поперечном сечении прибора. Детекторы взаимно экранированы и коллимированы в осевом направлении.

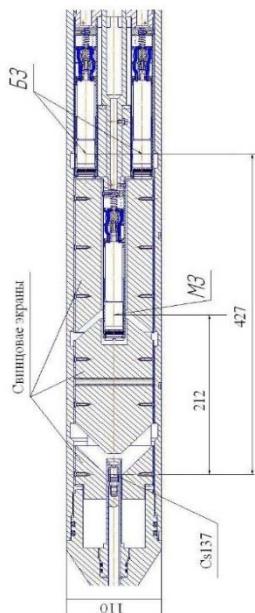


Рис. 1.3. Конструкция зондовой части СГДТ-НВ [44].

Для градуировки и калибровки скважинных гамма дефектоскопов и толщиномеров, еще в 80-е годы XX века во ВНИИнефтепромгеофизике была разработана калибровочная установка УПТП-1. [47]

Основной узел в установке УПТП-1 – блок образцов толщины и плотности, который предназначен для воспроизведения толщины стенки обсадных труб и плотности вещества в затрубном пространстве (рисунок 1.4.) [47].

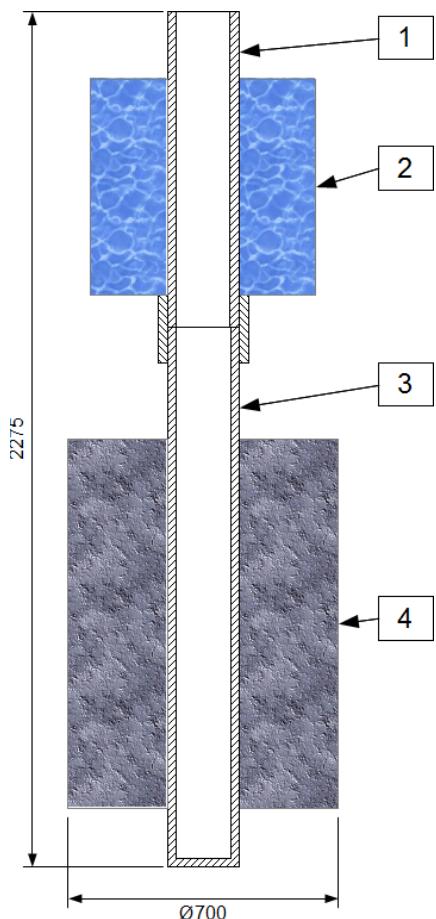


Рис. 1.4. Схема блоков образцов толщины и плотности [47]

В состав установки УПТП-1 входит шесть блоков: три блока для колонны Ø146мм и три блока для колонны 168мм. Конструктивно каждый блок образцов представляет собой отрезок обсадной трубы с муфтой (3). На труbe размещена цилиндрический бак (4) в нем размещается среда, имитирующая плотность вещества в затрубном пространстве. В верхнюю часть трубы установлен патрубок (1), также с цилиндрическим баком (2). В баке размещается поглощающая среда. Толщина стенки патрубка калиброванная.

В качестве среды, имитирующей плотность вещества в затрубном пространстве скважины, применяются вода и стеклянные шарики.

Метрологические характеристики установки УПТП-1 приведены в таблице 3.

Таблица 3. Метрологические характеристики установки УПТП-1

№ п.п.	Труба образца плотности		Образцы толщины стенки колонны		Плотность вещества в затрубном пространстве	
	Ø, мм	H _{ст} , мм	Ø, мм	H _{ст} , мм	Состав	ρ, кг/м ³
1	146	6,5±0,1	146	5,87±0,03	Вода	1000
2	146	6,7±0,1	146	7,90±0,03	Стеклянные шарики, воздух	1550
3	146	6,6±0,1	146	9,79±0,03	Стеклянные шарики, вода	1945
4	168	7,1±0,1	168	5,94±0,03	Вода	1000
5	168	7,3±0,1	168	7,87±0,03	Стеклянные шарики, воздух	1550
6	168	7,0±0,1	168	9,99±0,03	Стеклянные шарики, вода	1945

В работе [41] для калибровки аппаратуры СГДТ и ЦМ предлагается использовать калибровочные установки (СО-ПТ), представляющие собой стандартные образцы плотности вещества в затрубном пространстве колонны. Конструктивно стандартные образцы выполнены в виде шести цилиндрических стаканов высотой 3,5 м и диаметром 1,6 м с расположенными внутри стакана стальными колоннами различного диаметра, каждая из которых состоит из трех составных частей длиной 1 м с разной толщиной стенки. Пространство внутри стаканов заполнено веществом, имитирующим различные плотности заколонного пространства. Метрологические характеристики СО-ПТ приведены в таблице 4.

Таблица 4. Метрологические характеристики СО-ПТ.

Тип СО плотности и толщины	Ø,мм	ρ, кг/м ³	H _{ст} ,мм
СОТП-1000-146-6,4-7,9-9,3	146	1000	6,4; 7,9; 9,3
СОТП-1630-146-5,7-8,3-9,0	146	1630	5,7; 8,3; 9,0
СОТП-2030-146-5,6-8,3-8,6	146	2030	5,6; 8,3; 8,6
СОТП-1000-168-6,1-8,1-10,2	168	1000	6,1; 8,1; 10,2
СОТП-1630-168-6,6-8,1-9,6	168	1630	6,6; 8,1; 9,6
СОТП-2030-168-6,7-8,1-9,6	168	2030	6,7; 8,1; 9,6
СОТП-1000-245-5,7-7,2-8,7	245	1000	5,7; 7,2; 8,7
СОТП-1630-245-7,1-8,5-10,1	245	1630	7,1; 8,5; 10,1
СОТП-2030-245-7,4-8,9-10,5	245	2030	7,4; 8,9; 10,5

Конструкция установки УПТП-1 и стандартных образцов СО-ТП представляет собой двухслойную среду: обсадная колонна и среда, имитирующая плотность заколонного пространства.

Градиуровочные зависимости, построенные с использованием таких образцов, отражают зависимость каждого отдельного зонда на изменение одного параметра. Для малого зонда строится зависимость для толщины стенки колонны, для большого зонда – зависимость от плотности заколонного пространства. Использование указанных зависимостей для интерпретации скважинных измерений не совсем корректно из-за несоответствия конструкции скважины и конструкции УПТП-1 и СО-ТП.

Реальная обсаженная скважина представляет собой трехслойную среду: стальная обсадная колонна, слой цементного камня и горные породы. При этом слой цемента в зависимости от диаметра скважины и диаметра обсадной колонны варьируется в диапазоне 15-30 мм.

Использование зависимостей, полученных на двухслойных образцах, при интерпретации скважинных измерений дает информацию о плотности заколонного пространства в общем, которая включает в себя плотность цемента и плотность горных пород.

Разделить влияние плотности вмещающих пород и плотности цемента позволяют эталоны с «геометрией», максимально соответствующей конструкции скважин.

1.3. Задачи исследований. Обоснование основных требований к метрологическому обеспечению аппаратуры гамма-гамма каротажа нефтяных и газовых скважин

Проведенный автором анализ современного состояния метрологического обеспечения аппаратуры гамма-гамма каротажа для нефтяных и газовых скважин показал наличие определенных проблем и позволил сформулировать требования к метрологическому обеспечению аппаратуры гамма-гамма каротажа нефтяных и газовых скважин, учитывающих описанные выше проблемы и пути их решения.

Метрологическое обеспечение аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа для открытого ствола нефтяных и газовых скважин должно соответствовать следующим требованиям:

- Метрологическое оборудование для аппаратуры ГГК-П и ГГК-ЛП при всех свойствах образцов выполненных в виде насыщенных моделей пластов, пересеченных скважиной, должно максимально сократить время проведения обязательной ежеквартальной калибровки аппаратуры, место, занимаемое в помещении, а также радиационную нагрузку на персонал.
- Габариты образцов должны обеспечивать насыщенность поля гамма-излучения на уровне не менее 95 %;
- Диапазон воспроизведения плотности горных пород 1700-2700 кг/м³;
- Основная относительная погрешность аттестованных значений плотности не более ± 0,7 %;
- Диапазон воспроизведения эффективного атомного номера горных пород Z_{эфф.} 10-17, в единицах индекса фотоэлектрического поглощения Р_е 1-7 барн/электрон;
- Основная абсолютная погрешность аттестованных значений эффективного атомного номера не более ± 0,1.

Метрологическое обеспечение аппаратуры по оценке технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом должно соответствовать следующим требованиям:

- Конструкция образцов должна максимально соответствовать реальным условиям скважинных измерений, т.е. представлять собой трехслойные образцы, позволяющие воспроизводить параметры обсадной колонны, цементного камня и плотности породы;
- Диапазон воспроизведения толщины стенки обсадной колонны 5-10 мм;
- Основная абсолютная погрешность аттестованных значений толщины стенки обсадной колонны на более ± 0,01мм;

- Диапазон воспроизведения плотности цементного камня 1000-2000 кг/м³;
- Основная абсолютная погрешность аттестованных значений плотности цементного камня не более ±20 кг/м³;
- Диапазон воспроизведения плотности породы 1000-2500 кг/м³;
- Основная относительная погрешность аттестованных значений плотности породы ± 1,5%.

Основываясь на результатах математического моделирования и результатах измерений в физических моделях, разработать интерпретационную модель, позволяющую максимально точно учитывать влияние плотности породы при определении параметров обсадной колонны и цементного камня.

Разработать техническое решение, позволяющее определять параметры цементного камня и стенки обсадной колонны с учетом влияния плотности породы за одну спускоподъемную операцию без привлечения дополнительных каротажных данных.

2. РАЗРАБОТКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АППАРАТУРЫ ПЛОТНОСТНОГО И ЛИТОПЛОТНОСТНОГО ГАММА-ГАММА КАРОТАЖА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

2.1. Обоснование конструкции и свойств первичных эталонов геофизических параметров для аппаратуры плотностного и литоплотностного каротажа, выполненных в виде моделей пластов, пересеченных скважиной

Как уже отмечалось в главе 1, для повышения точности скважинных измерений аппаратурой плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа различных типов градуировку и калибровку аппаратуры необходимо проводить в стандартных образцах, выполненных в виде моделей пластов, пересеченных скважиной.

В качестве исходного эталона объемной плотности ($\rho_{об}$) и эффективного атомного номера горных пород ($Z_{\text{эфф.}}$), 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 заглущенным зумпфом [48, 49].

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

Для изготовления образцов использовались следующие материалы:

- монолитный блок CaCO_3 размером $1000 \times 1000 \times 1000$ мм;
- пруток алюминиевый марки АД-0 размером $\varnothing 800 \times 850$ 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.

Всего в комплект входит 9 стандартных образцов, состав и параметры которых приведены в таблице 5.

Таблица 5. Метрологические характеристики стандартных образцов плотности и эффективного атомного номера ООО «Газпром георесурс»

Индекс СО.	Состав СО		$\rho_{\text{об.}},$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$\rho_{\text{экв.}},$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$Z_{\text{эфф}}$
	Матрица	Насыщение			
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	CaCO ₃ (к)+SiO ₂ (м)	Вода	2407	2407	14,61
СОГГК-ЛП-4	SiO ₂ (м)	Вода	2020	2020	11,28
СОГГК-ЛП-5	SiO ₂ (м)	Воздух	1698	1625	11,79
СОГГК-ЛП-6	SiO ₂ (к)+SiO ₂ (м)	Воздух	2181	2144	11,79
СОГГК-ЛП-7	SiO ₂ (к)+CaCO ₃ (м)	Воздух	2198	2162	13,26
СОГГК-ЛП-8	CaCO ₃ (к)+SiO ₂ (м)	Воздух	2262	2231	14,82
СОГГК-ЛП-9	CaCO ₃ (к)+CaCO ₃ (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 раздельно оценить влияние каждого из этих параметров на результаты измерений. С этой целью были созданы образцы, имеющие практически одинаковую плотность, но существенно отличающиеся по эффективному атомному номеру $Z_{\text{эфф}}$ образцы 6-9 (в таблице 5).

2.2. Методика разработки и изготовления стандартных образцов.

Насыпные образцы выполнены в виде цилиндрических контейнеров, заполненных соответствующим материалом и пересечены по центру скважиной диаметром 200 мм. Скважины обсажены стеклопластиковой трубой с толщиной стенки 3 мм. Контейнеры имеют внешний диаметр 1000 мм с толщиной стенки 5 мм, высотой 850 мм.

Для обеспечения стабильности параметров этих моделей необходимо, чтобы мелкая фракция заполняла максимально плотно поровое пространство между более крупными гранулами, а вода заполняла всё оставшиеся пустоты. Такая компактная

укладка исключает перераспределение фракций в объеме стандартного образца в процессе его эксплуатации.

Объем емкостей определялся объемом вмещающейся в них воды.

2.2.1. Изготовление стандартных образцов плотности и эффективного атомного номера СОГГК-ЛП-1 и СОГГК-ЛП-2

СОГГК-ЛП-1 и СОГГК-ЛП-2 изготавливались из монолитного мраморного блока и прутка алюминиевого сплава марки АД-0. В первом с помощью алмазной коронки в центре просверлили отверстие диаметром 200 мм. Во втором на токарном станке просверлили отверстие, также, диаметром 200мм.

2.2.2. Изготовление стандартного образца плотности и эффективного атомного номера СОГГК-ЛП-3

Измеренный объем контейнера равен 0,639 м³.

Для изготовления стандартного образца использовались мраморная крошка фракцией 10-20 мм (M_{mp}), кварцевый песок фракцией 0,2-0,5 мм (M_p) и питьевая вода (M_b).

По результатам моделирования на емкости малого объема была отработана послойная технология укладки материала в трехкомпонентный стандартный образец, которая сводится к следующему:

- 1) укладывается слой мраморной крошки толщиной 20-25 мм (для натуральных габаритов масса гранул на один слой составляет 26-27 кг);
- 2) сверху равномерно по площади засыпается и трамбуется такая порция песка, чтобы заполнить пустоты между гранул (для натуральных габаритов масса песка на один слой составляет 9-9,5 кг);
- 3) заполненный твердыми компонентами слой заливается водой (2,5 л).

Последующие слои укладываются по той же технологии.

В процессе укладки слоев визуально контролировалась полнота заполнения пустот крупной фракции. При необходимости пустоты заполнялись дополнительной порцией кварцевого песка.

В результате укладки всех слоев, массы компонент составили:

$M_{mp}=1039$ кг, $M_p=393$ кг, $M_b=106$ л.

При объеме $V=0,639 \text{ м}^3$, минералогической плотности мрамора $\rho_{\text{мр}}= 2710 \text{ кг/м}^3$ и песка $\rho_{\text{п}}= 2650 \text{ кг/м}^3$ получаем:

Плотность модели - 2407 кг/м^3 , Зэфф - 14,61.

2.2.3. Изготовление стандартного образца плотности и эффективного атомного номера СОГГК-ЛП-4

Измеренный объем контейнера равен $0,639 \text{ м}^3$.

Для изготовления стандартного образца использовались кварцевый песок фракцией 0,2-0,5 мм ($M_{\text{п}}$) и питьевая вода ($M_{\text{в}}$).

Порядок изготовления стандартного образца: в емкость заливалось 20 л воды, затем туда засыпалась мерная порция песка до такого уровня, чтобы на поверхности не оставалось воды (~92кг). Затем для уплотнения проводилась трамбовка песка и процедура повторялась.

В результате укладки всех слоев, массы компонент составили:

$M_{\text{п}}=1050 \text{ кг}$, $M_{\text{в}}=240 \text{ л}$.

При объеме $V=0,639 \text{ м}^3$:

Плотность модели - 2020 кг/м^3 , Зэфф – 11,28.

2.2.4. Изготовление стандартного образца плотности и эффективного атомного номера СОГГК-ЛП-5

Измеренный объем контейнера равен $0,639 \text{ м}^3$.

Для изготовления стандартного образца использовался кварцевый песок фракцией 0,2-0,5 мм ($M_{\text{п}}$).

Порядок изготовления модели. Весь объем контейнера был разбит по высоте на 17 зон по 5 см каждая. В каждую зону укладывалось три отмеренные порции песка по 21 кг. После заполнения каждой зоны осуществлялось уплотнение песка. При этом контролировалось, чтобы в каждую зону укладывались равные массы песка. Последняя зона засыпалась индивидуально до полного заполнения вымеренного объема.

В результате укладки всех слоев, массы компонент составили:

$M_{\text{п}}=1084 \text{ кг}$.

При объеме $V=0,639 \text{ м}^3$:

Объемная плотность модели - 1696кг/м³, Zэфф – 11,79.

2.2.5. Изготовление стандартных образцов плотности и эффективного атомного номера СОГГК-ЛП-6 и СОГГК-ЛП-7

Внутренняя полость контейнера разделена вертикальной перегородкой на два равных объема по 0,3195 м³, один (СОГГК-ЛП-6) из которых заполняется смесью из крупных (10-20 мм) гранул кварцевого щебня ($M_{Пкр}$) и мелких (0,2-0,5) гранул кварцевого песка ($M_{Пм}$).

Аналогично укладке СОГГК-ЛП-3, в измеренный объем укладывался слой крупных гранул кварцевого щебня слоем 20-25 мм, сверху равномерно засыпалась и трамбовалась порция мелких гранул кварцевого песка необходимая для заполнения всех пустот. Последующие слои укладывались по той же технологии.

В результате укладки всех слоев, массы компонент составили:

$$M_{Пкр}=502 \text{ кг}, M_{Пм}=195 \text{ л.}$$

При объеме $V=0,3195 \text{ м}^3$:

Объемная плотность модели - 2181кг/м³, Zэфф – 11,79.

Второй (СОГГК-ЛП-7) заполняется смесью из крупных (10-20 мм) гранул кварцевого щебня ($M_{Пкр}$) и мелких (0,2-0,5) гранул мраморного песка ($M_{Мм}$).

Аналогично укладке СОГГК-ЛП-6, в измеренный объем укладывался слой крупных гранул кварцевого щебня слоем 20-25 мм, сверху равномерно засыпалась и трамбовалась порция мелких гранул мраморного песка необходимая для заполнения всех пустот. Последующие слои укладывались по той же технологии.

В результате укладки всех слоев, массы компонент составили:

$$M_{Пкр}=491 \text{ кг}, M_{Мм}=212 \text{ л.}$$

При объеме $V=0,3195 \text{ м}^3$:

Объемная плотность модели - 2198кг/м³, Zэфф – 13,30.

2.2.6. Изготовление стандартных образцов плотности и эффективного атомного номера СОГГК-ЛП-8 и СОГГ-ЛП-9

Внутренняя полость контейнера разделена вертикальной перегородкой на два равных объема по 0,3195 м³, один (СОГГК-ЛП-8) из которых заполняется смесью

из крупных (10-20 мм) гранул мраморного щебня ($M_{M_{kp}}$) и мелких (0,2-0,5) гранул кварцевого песка (M_{Pm}).

В измеренный объем укладывался слой крупных гранул мраморного щебня слоем 20-25 мм, сверху равномерно засыпалась и трамбовалась порция мелких гранул кварцевого песка необходимая для заполнения всех пустот. Последующие слои укладывались по той же технологии.

В результате укладки всех слоев, массы компонент составили:

$$M_{M_{kp}}=520 \text{ кг}, M_{Pm}=203 \text{ л.}$$

При объеме $V=0,3195 \text{ м}^3$:

Объемная плотность модели - 2262кг/м³, Zэфф – 14,86.

Второй (СОГГКЛП-9) заполняется смесью из крупных (10-20 мм) гранул мраморного щебня и мелких (0,2-0,5) гранул мраморного песка.

В измеренный объем укладывался слой крупных гранул мраморного щебня слоем 20-25 мм ($M_{M_{kp}}$), сверху равномерно засыпалась и трамбовалась порция мелких гранул мраморного песка (M_{Mm}) необходимая для заполнения всех пустот. Последующие слои укладывались по той же технологии.

В результате укладки всех слоев, массы компонент составили:

$$M_{M_{kp}}=517 \text{ кг}, M_{Mm}=211 \text{ л.}$$

При объеме $V=0,3195 \text{ м}^3$:

Объемная плотность модели - 2276кг/м³, Zэфф – 15,71.

2.3. Расчет аттестованных значений стандартных образцов и погрешности аттестованного значения

Определение аттестованных значений и погрешности параметров стандартных образцов проводилось в соответствии с РМГ-93-2009.

Для определения параметров СО использовались:

- платформенные электронные весы ВПА-50-1 модель с погрешностью измерения в диапазоне до 20 кг включительно - 0.01 кг, а в диапазоне свыше 20 кг -0,02 кг, дискретностью 0.01 кг;
- мерник типа М1Р-20-01, $V= 20 \text{ дм}^3$ с погрешностью измерения 0.02%;

- весы для гидростатического взвешивания ВЛГ-МГ4 класс точности 2.

2.3.1. Определение параметров монолитных стандартных образцов

Параметры материалов монолитных стандартных образцов СОГГК-ЛП-1 (мрамор) и СОГГК-ЛП-2 (алюминиевый сплав АД0) определялись методом гидростатического взвешивания проб материалов.

Метод гидростатического взвешивания позволяет определить плотность ρ , минералогическую плотность $\rho_{\text{мин}}$ и коэффициент пористости Кп. Для нахождения этих параметров по каждому образцу выполняются следующие измерения:

M_1 - вес просушенного образца в воздухе;

M_2 – вес образца, насыщенного водой в воде;

M_3 - вес образца, насыщенного водой в воздухе.

Для непористого материала (алюминиевый сплав АД0) выполняются два измерения: т.к. $M_1=M_3$,

По результатам измерений вычисляются значения искомых параметров:

$$K_p = \frac{(M_3 - M_1)}{(M_3 - M_2)} \quad (5)$$

$$\rho_{\text{мин}} = \frac{\rho_B \times M_1}{(M_1 - M_2)} \quad (6)$$

$$\rho = \rho_B \times K_p + \rho_{\text{мин}} \times (1 - K_p) \quad (7)$$

В выражениях (6) и (7) $\rho_B=1000 \text{ кг/см}^3$ – плотность воды.

Значение эффективного атомного номера определялись по формуле (3).

Для исследования параметров из каждого монолитного образца было отобрано по двенадцать неразрушенных проб массой $\approx 300\text{г}$ каждая. Результаты измерений и рассчитанные значения плотности приведены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6. Результаты определения параметра Кп и плотности на образцах Коэлгинского мрамора.

№ п.п.	Вес образца, г			Кп, % абс	ρ_{\min} , кг/м ³	ρ , кг/м ³
	Сухого M1	насыщенного в воде M2	насыщенного в воздухе M3			
1	315,0	198,2	316,0	0,88	2698	2682
2	312,3	196,2	313,6	1,13	2690	2671
3	322,5	202,7	323,9	1,12	2693	2673
4	306,2	193,9	307,2	0,93	2727	2711
5	294,1	184,8	295,2	0,93	2690	2675
6	306,2	193,0	307,4	1,04	2704	2687
7	276,1	174,5	277,1	1,03	2719	2700
8	279,4	176,6	280,3	0,86	2718	2703
9	313,9	198,8	315,1	1,05	2728	2709
10	292,0	184,4	293,3	1,14	2713	2694
11	313,6	198,0	314,7	0,97	2714	2696
12	326,8	206,9	328,0	0,93	2724	2710
Среднее				1,00	2710	2692

Таблица 7. Результаты определения параметра плотности на образцах алюминия марки AD0.

№ п.п.	Вес образца, г		$\rho_{об}$, кг/м ³
	в воздухе M1	в воде M2	
1	210,2	132,4	2702
2	314,8	198,5	2707
3	321,6	202,7	2705
4	312,5	196,9	2703
5	287,1	180,5	2693
6	291,3	183,5	2702
7	284,7	179,1	2696
8	304,9	191,9	2698
9	294,2	185,0	2694
10	308,8	194,7	2706
11	294,5	185,2	2694
12	315,0	198,3	2699
Среднее			2700

Основные погрешности аттестованных значений монолитных образцов оценивались путем определения разности максимального и минимального значений в выборке, деленных пополам. Для СОГГК-ЛП-1 погрешность аттестованного значения составила $\pm 0,2\%$, для СОГГК-ЛП-2 - $\pm 0,1\%$.

2.3.2. Определение параметров насыпных стандартных образцов

Значения объемной плотности ρ , насыпных стандартных образцов определяются по результатам измерений заполняемого объема контейнера V (m^3) и массы каждой из компонент M_i (кг), загруженной в контейнер.

Для смеси компонент её плотность рассчитывается по формуле:

$$\rho = \frac{\sum_i M_i}{V} \quad (8)$$

Аттестованные значения эквивалентной плотности и эффективного атомного номера определялись по формуле (2) и (3) соответственно.

Неопределенность значений параметров ρ , и $Z_{\text{эфф}}$ для насыпных стандартных образцов складывается из следующих составляющих:

1. Погрешность массы каждой из компонент ΔM_i , заполняющей контейнер стандартного образца.
2. Погрешность определения объема заполняемой ёмкости ΔV
3. Погрешностью определения элементного состава компонент Δp_i

Значения этих составляющих определяются погрешностями применяемых средств измерения, соответственно весов и мерников.

Для смеси компонентов и её погрешность плотности рассчитываются по формулам:

$$\Delta\rho = \sqrt{\frac{\sum_i \Delta M_i^2 + \left(\frac{\Delta V}{V \times \sum_i M_i}\right)^2}{V}} \quad (9)$$

Для эффективного атомного номера $Z_{\text{эфф}}$:

$$\Delta Z_{\text{эфф}} = \sqrt{\left(\frac{Z_{\text{эфф}}^{(1-3,6)}}{3,6}\right)^2 \times \sum_i \left(\Delta M_i Z_{\text{эфф}}^{3,6}\right)^2 + Z_{\text{эфф}}^{2(1-3,6)} \times \sum_i \left(M_i Z_{\text{эфф}} \Phi_i^{3,6}\right)^2} \quad (10)$$

Результаты измерений представляют в виде

$$C_A \pm \Delta, \quad P = 0,95; \quad (11)$$

где C_A – среднее значение (среднее арифметическое) аттестуемой характеристики, полученное в условиях внутри лабораторной прецизионности, принимаемое за аттестованное значение;

Δ_A – границы абсолютной погрешности аттестованного значения СО при $P=0,95$.

Аттестованные значения параметров стандартных образцов плотности и эффективного атомного номера приведены в таблице 6. Погрешность аттестованных значений плотности СО не превышает $\pm 0,5\%$, эффективного атомного номера $\pm 0,1$ абсолютных единиц.

2.4. Исследование неоднородности стандартных образцов

Стандартный образец можно считать насыщенным по гамма-излучению, если интенсивность излучения, измеряемая по оси скважины стандартного образца на нескольких уровнях вблизи от геометрического центра, практически постоянна.

Оценка однородности стандартных образцов производилась по результатам измерений интенсивности гамма-излучения на трех уровнях в скважине. Первый уровень соответствует геометрическому центру, второй и третий отстоят от центра вверх по оси скважины соответственно на 0.10 и 0.20 м. Измерения проводились в четырех азимутальных положениях датчика, различающихся на 90° . Результаты измерений приведены в таблице № 8.

Обработка экспериментальных данных производилась методом однофакторного дисперсионного анализа. Рассчитывались выборочные дисперсии S_E^2 и S_A^2 , характеризующие соответственно разброс результатов измерений на уровнях и между уровнями. Отношение выборочных дисперсий сравнивалось с 0,05 процентным квантилем распределения Фишера.

Таким образом результаты обработки, приведенные в таблице № 8 и 9, позволяют утверждать, что стандартные образцы однородны по гамма-излучению.

Таблица 8. Оценка однородности образцов СОГГК-ЛП-1 – СОГГК-ЛП-2.

Индекс СО	Высота	Угол	0°	90°	180°	270°	$\Delta \rho\%$
		Плотность, кг/м³					
СОГГК-ЛП-1	+10 см	2691	2694	2695	2695	2695	0,15
	Рабочая точка	2692	2693	2696	2693	2693	0,15
	-10 см	2693	2695	2694	2691	2691	0,15
СОГГК-ЛП-2	+10 см	2591	2589	2591	2593	2593	0,15
	Рабочая точка	2590	2585	2585	2593	2593	0,3
	-10 см	2589	2587	2593	2591	2591	0,22
СОГГК-ЛП-3	+10 см	2411	2404	2404	2409	2409	0,29
	Рабочая точка	2410	2409	2408	2410	2410	0,08
	-10 см	2407	2403	2405	2404	2404	0,17
СОГГК-ЛП-4	+10 см	2022	2018	2022	2017	2017	0,25
	Рабочая точка	2019	2020	2017	2019	2019	0,15
	-10 см	2020	2022	2020	2023	2023	0,15
СОГГК-ЛП-5	+10 см	1626	1626	1625	1623	1623	0,18
	Рабочая точка	1624	1625	1625	1626	1626	0,12
	-10 см	1626	1623	1625	1624	1624	0,18

Таблица 9. Оценка однородности образцов СОГГК-ЛП-6 – СОГГК-ЛП-9.

Индекс СО	Высота	Угол	Плотность, кг/м ³				$\Delta \rho\%$, кг/м ³
			0°	-45°	+45°	-	
СОГГК-ЛП-6	+10 см		2146	2146	2143	-	0,14
	Рабочая точка		2142	2147	2146	-	0,23
	-10 см		2144	2143	2142	-	0,09
СОГГК-ЛП-7	+10 см		2225	2225	2227	-	0,27
	Рабочая точка		2225	2225	2226	-	0,18
	-10 см		2226	2228	2228	-	0,09
СОГГК-ЛП-8	+10 см		2230	2230	2232	-	0,09
	Рабочая точка		2230	2230	2231	-	0,04
	-10 см		2231	2233	2233	-	0,09
СОГГК-ЛП-9	+10 см		2249	2244	2247	-	0,22
	Рабочая точка		2248	2246	2244	-	0,18
	-10 см		2247	2248	2244	-	0,18

2.5. Проведение измерений в стандартных образцах плотности

Измерения при калибровке должны выполняться с использованием оборудования, соответствующего по своим характеристикам тому, которое будет использовано при скважинных исследованиях (геофизический кабель, регистратор, источник гамма-квантов и др.).

По высоте прибор в образцах устанавливается так, чтобы рабочая точка находилась на 30-40 см ниже крышки образца. Независимо от конструкции прибора за рабочую точку принято положение, находящееся в 20 см от центра источника гамма-квантов в сторону детекторов. Для удобства установки прибора полезно предварительно на корпусе прибора нанести метку. При измерениях прибор должен быть прижат к стенке скважины. Прижим может достигаться рычагом скважинного прибора или специальной «рессорой».

Калибровочные измерения выполняются в режиме квантования по времени. Рекомендуемый шаг квантования - 3 с. Общее время каждого измерения должно быть не менее 5 минут. Первичные результаты измерений в каждом образце записываются в отдельный файл.

В журнале калибровок необходимо зафиксировать дату проведения калибровки, тип и номер прибора, тип регистратора и его номер, а также основные параметры калибровочных измерений:

- марка кабеля и его длина;
- номер и активность источника гамма-квантов;
- шаг квантования.

В процессе записи оператор контролирует качество измерений по отображению диаграмм на экране монитора - на диаграммах не должно быть выбросов, значительно превосходящих уровень естественных флюктуаций, а также дрейфа или периодических изменений показаний в каналах.

Порядок измерений при калибровке.

- не заряжая источник опустить прибор в один из образцов и измерить фон;
- извлечь прибор из образца и с помощью манипулятора установить в него источник гамма-квантов;
- последовательно, устанавливая прибор в рабочую точку, провести измерения в каждом из трех образцов;
- с помощью манипулятора извлечь источник из прибора и поместить его в контейнер.

При спуске и извлечении прибора прижимной механизм должен находиться в сложенном состоянии.

2.6. Построение функции преобразования для определения плотности горных пород, двухзондовой аппаратурой плотностного гамма-гамма каротажа

Исходным регистрируемым параметром в аппаратуре плотностного гамма-гамма каротажа является количество вспышек, зарегистрированных фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), возникающих при взаимодействии гамма-квантами с детектором. Обычно в приборах ГГК-П используются сцинтилляционные детекторы NaJ [50, 51, 52, 53, 54, 55, 56,]. Далее сигналы поступают на формирователь импульсов, блоком телеметрии накопленные

импульсы передаются по кабелю на регистрирующий комплекс. Импульсы могут сохраняться, как в единицу времени, так и на квант глубины.

Получение функции преобразования регистрируемых параметров от плотности горных пород, проводится при первом выпуске аппаратуры с завода изготовителя, помимо функции преобразования определяется определяющая метрологическая характеристика, как погрешность определения плотности.

Для любой аппаратуры плотностного гамма-гамма каротажа, определяющей плотность горных пород по показаниям двух зондов разной длины (обычно 200 и 400 мм.), функция преобразования в общем виде выглядит следующим образом [57]:

$$\rho = \rho_0 + K \times \ln \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (12)$$

где **K** – параметр характеризующий чувствительность аппаратуры к изменению плотности (единое значение для аппаратуры конкретного типа);

A – измеренное значение отношения скорости счета на ближнем и дальнем зондах;

A₀ – нормировочный параметр, смысл которого – значение отношения для плотности ρ_0 (индивидуальная характеристика конкретного экземпляра аппаратуры).

На рисунке 2.1. приведены результаты измерения девятью приборами плотностного гамма-гамма каротажа, одного изготовителя из одной партии.

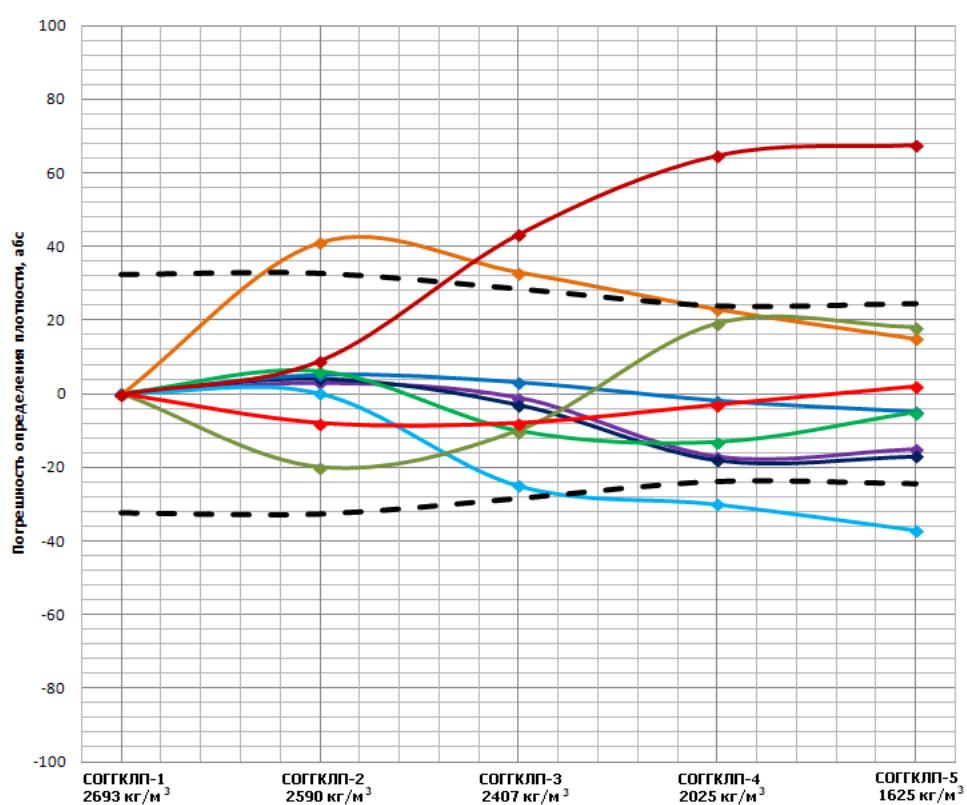


Рис. 2.1. Результаты определения плотности СО аппаратурой ГГКП, при определении нормировочного параметра по одному образцу. Пунктиром показан коридор допустимой погрешности [48, 49].

В данном случае параметр A_0 равен отношению показаний малого к большому зонду в СОГГК-ЛП-1 (монолитный мрамор с плотностью 2693 кг/м^3).

Как видно из рисунка результаты определения плотности шестью из девяти приборов не превышают пределы допустимой погрешности (пунктирные линии). Однако, некоторые экземпляры показывают значительные, до 70 кг/м^3 погрешности, которые вызваны как случайной ошибкой измерений на стандартных образцах (в том числе и на образце, по которому осуществляется калибровка), так и отличием чувствительности конкретного экземпляра аппаратуры от принятого стандартного значения для приборов данного типа.

Для снижения погрешностей такого типа целесообразно нормировать показания на коэффициент, полученный по совокупности измерений во всех образцах, используемых при калибровке (рисунок 2.2.).

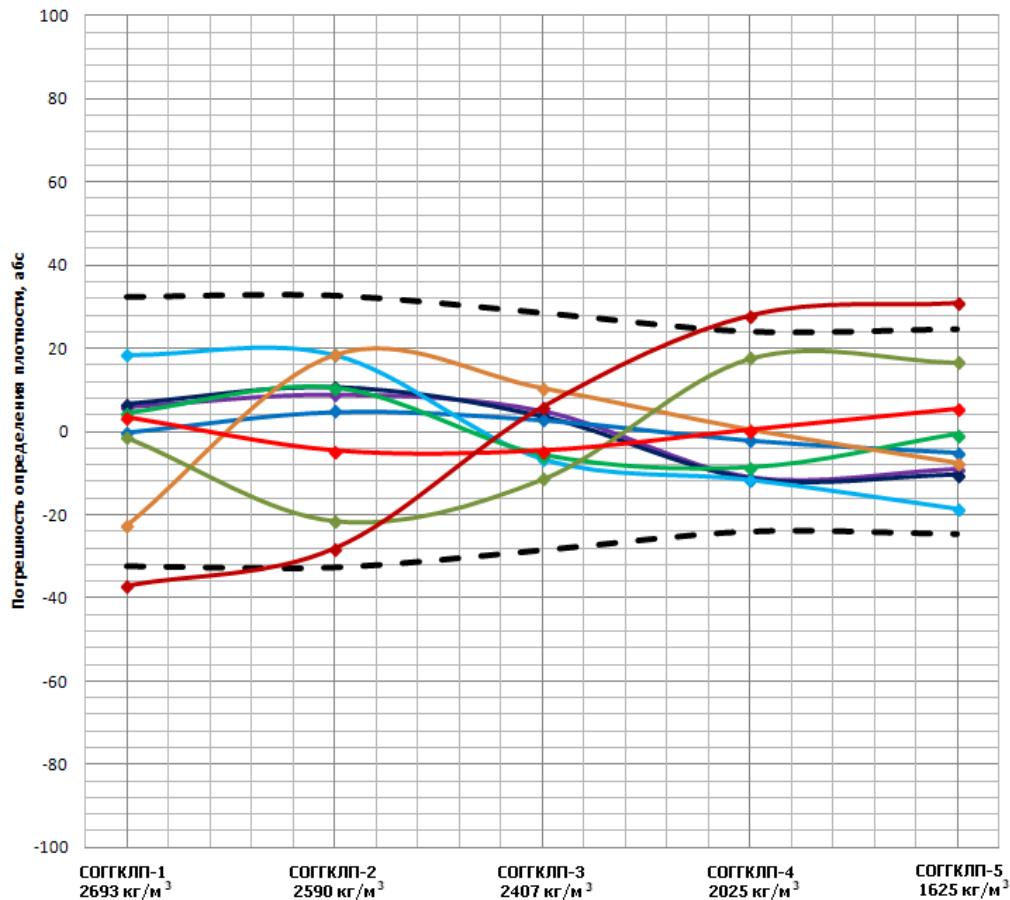


Рис. 2.2. Результаты определения плотности СО аппаратурой ГГКП, при определении нормировочного параметра по совокупности измерений во всех образцах. Пунктиром показан коридор допустимой погрешности [48, 49].

В результате использования такой методики определения нормировочного параметра A_0 погрешность определения плотности стандартных образцов практически всех экземпляров аппаратуры укладывается в коридор допустимых значений.

2.7. Построение функции преобразования для определения эффективного атомного номера горных пород аппаратурой литоплотностного гамма-гамма каротажа

Современная аппаратура литоплотностного гамма-гамма каротажа осуществляет регистрацию полного спектра рассеянного гамма-излучения. В работе [27] установлены диапазоны энергий, чувствительные к изменению эффективного атомного номера ($Z_{\text{эфф.}}$) и плотности (ρ) горных пород. Диапазон энергий для параметра $Z_{\text{эфф.}}$ 42-92 кэВ, для параметра ρ – 150-500кэВ. Наиболее чувствительным непосредственно к эффективному атомному номеру является отношение показаний в окне мягкой части спектра к показаниям в окне жесткой части спектра (J_m/J_h).

Предложенная номенклатура стандартных образцов позволяет получить функцию преобразования для расчета эффективного атомного номера горных пород на образцах (СОГГК-ЛП-6 ÷ СОГГК-ЛП-9) практически с одинаковой плотностью и значениями $Z_{\text{эфф.}}$, перекрывающими весь диапазон измеряемый аппаратурой литоплотностного каротажа. Результаты измерений на других образцах позволяют оценить влияние плотности горных пород на определение эффективного атомного номера.

На рисунке 2.3. представлен вид основной зависимости для расчета $Z_{\text{эфф.}}$ для аппаратуры ЗГГКЛП (изготовитель ООО «Нефтегазгеофизика»). Прибор, помимо стандартных зондов ГГК решающих задачу определения плотности, оснащен третьим литологическим зондом, который регистрирует полный спектр рассеянного гамма-излучения. Детектор литологического зонда располагается примерно по середине между стандартными зондами.

По результатам измерений в СОГГК-ЛП-6 - СОГГК-ЛП-9 (красные точки) была получена зависимость для расчета $Z_{\text{эфф.}}$ при постоянной плотности породы $\sim 2200 \text{ кг}/\text{м}^3$. Полученная кривая хорошо описывается квадратичной функцией. Результаты измерений в остальных образцах позволяют оценить влияние плотности породы на $Z_{\text{эфф.}}$.

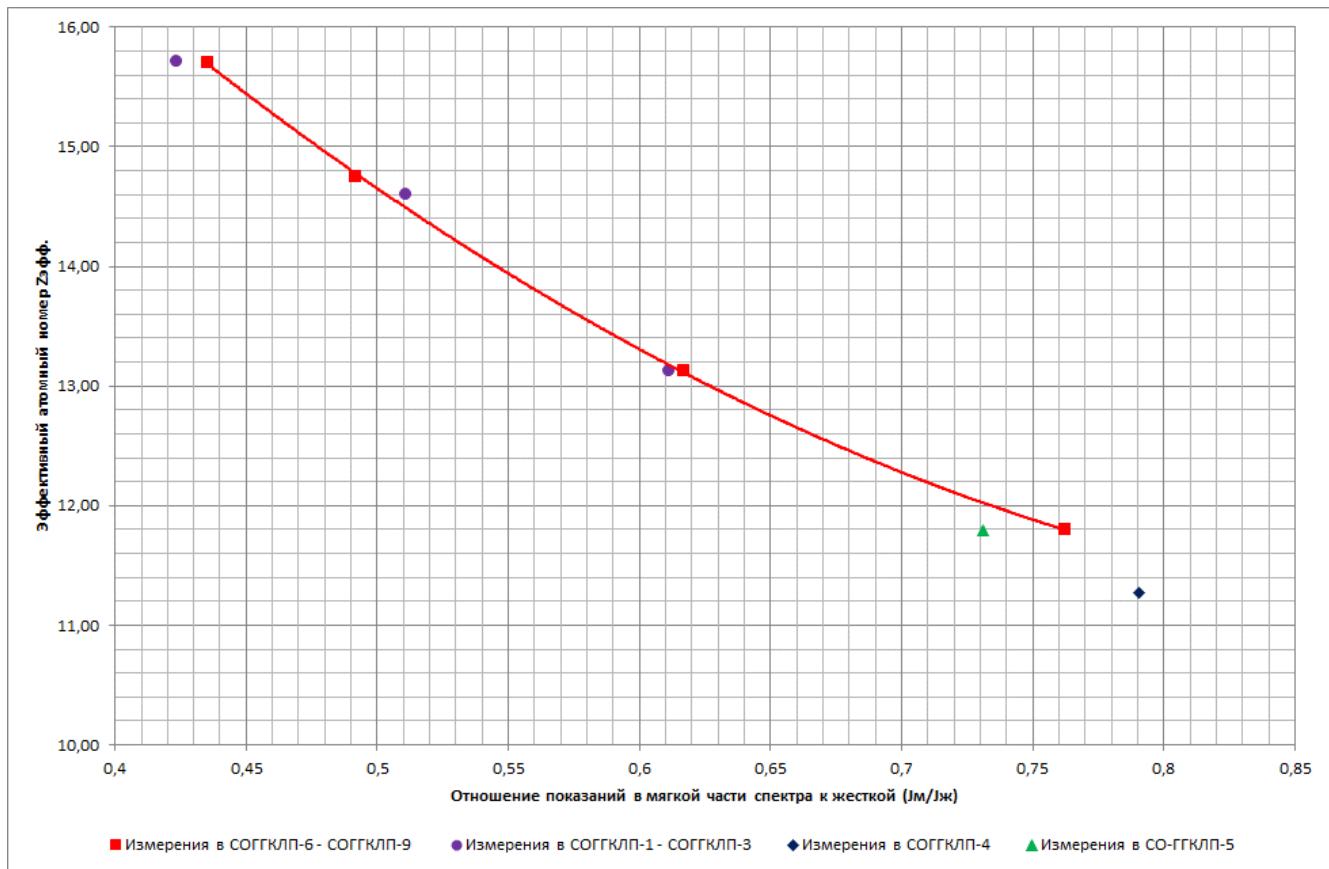


Рис. 2.3. Пример построения функции преобразования для расчета $Z_{\text{эфф}}$ по результатам измерений аппаратурой ЗГГКЛП на образцах с одинаковой плотностью.

Конкретно для этого случая разработчик аппаратуры провел работы по оптимизации длины литологического зонда [27]. Цель работы по оптимизации была подборка такой длины зонда, чтобы минимизировать влияние плотности на результаты определения $Z_{\text{эфф}}$.

Результаты измерения аппаратурой ЗГГКЛП на комплекте СОГГК-ЛП показывают, что влияние плотности на определение $Z_{\text{эфф}}$ не превышает 0,3 абсолютных единиц. Если получить основную зависимость по совокупности всех образцов, погрешность определения $Z_{\text{эфф}}$ не превысит 0,2 абсолютных единиц. Окончательный вид зависимости для аппаратуры ЗГГКЛП представлен на рисунке 2.4.

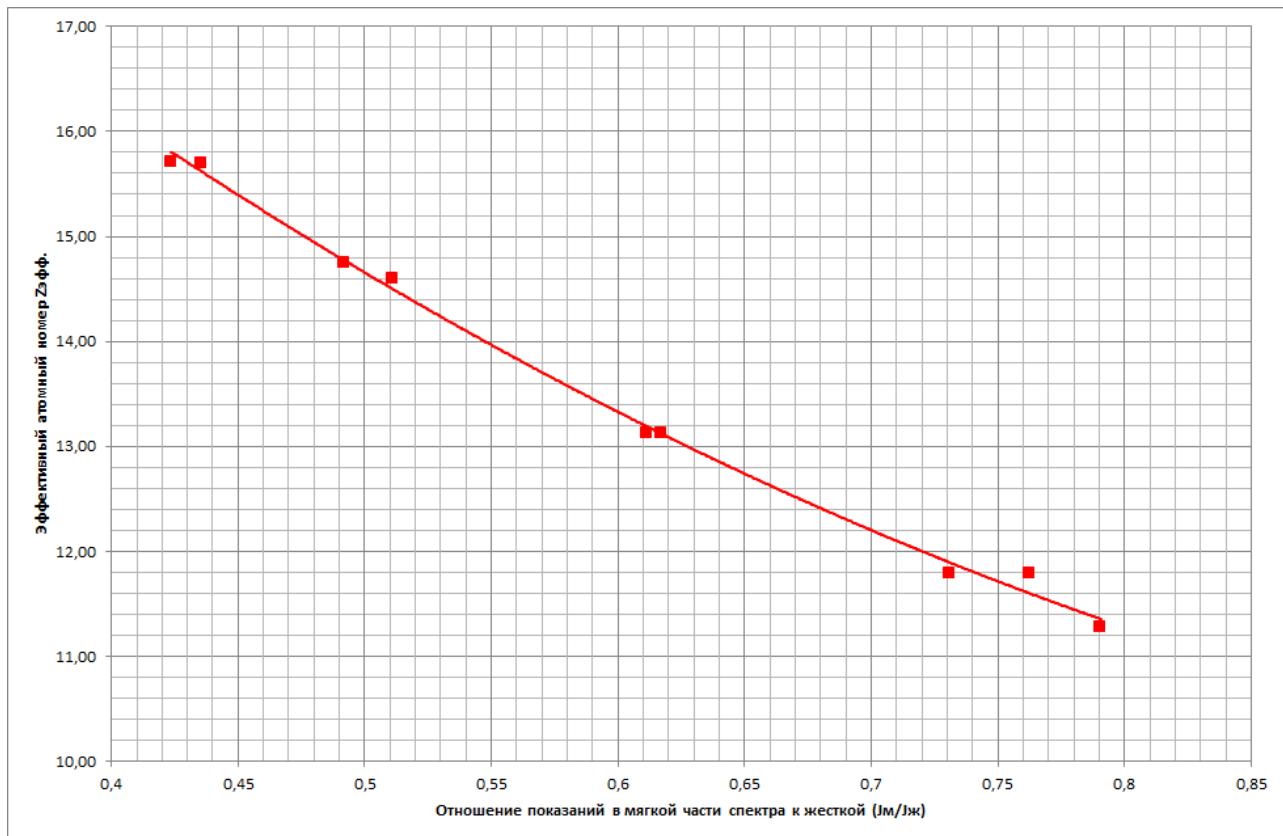


Рис. 2.4. Пример построения функции преобразования для расчета $Z_{\text{эфф}}$ по результатам измерений аппаратурой ЗГГКЛП по совокупности всех образцов входящих в комплект.

На рисунке 2.5. представлен вид основной зависимости для аппаратуры ГГК2-ЛП, разработчик ОАО НПФ «Геофизика». Основное отличие от аппаратуры ЗГГКЛП это то, что в ней используется два спектрометрических зонда стандартной длины (200 и 400 мм). Расчет плотности производится по отношению жестких частей спектра малого и большого зонда. Расчет $Z_{\text{эфф}}$ производится по отношению мягкой части спектра к жесткой – малого зонда т.е. длина литологического зонда, используемого в аппаратуре ГГК2-ЛП меньше чем в аппаратуре ЗГГКЛП.

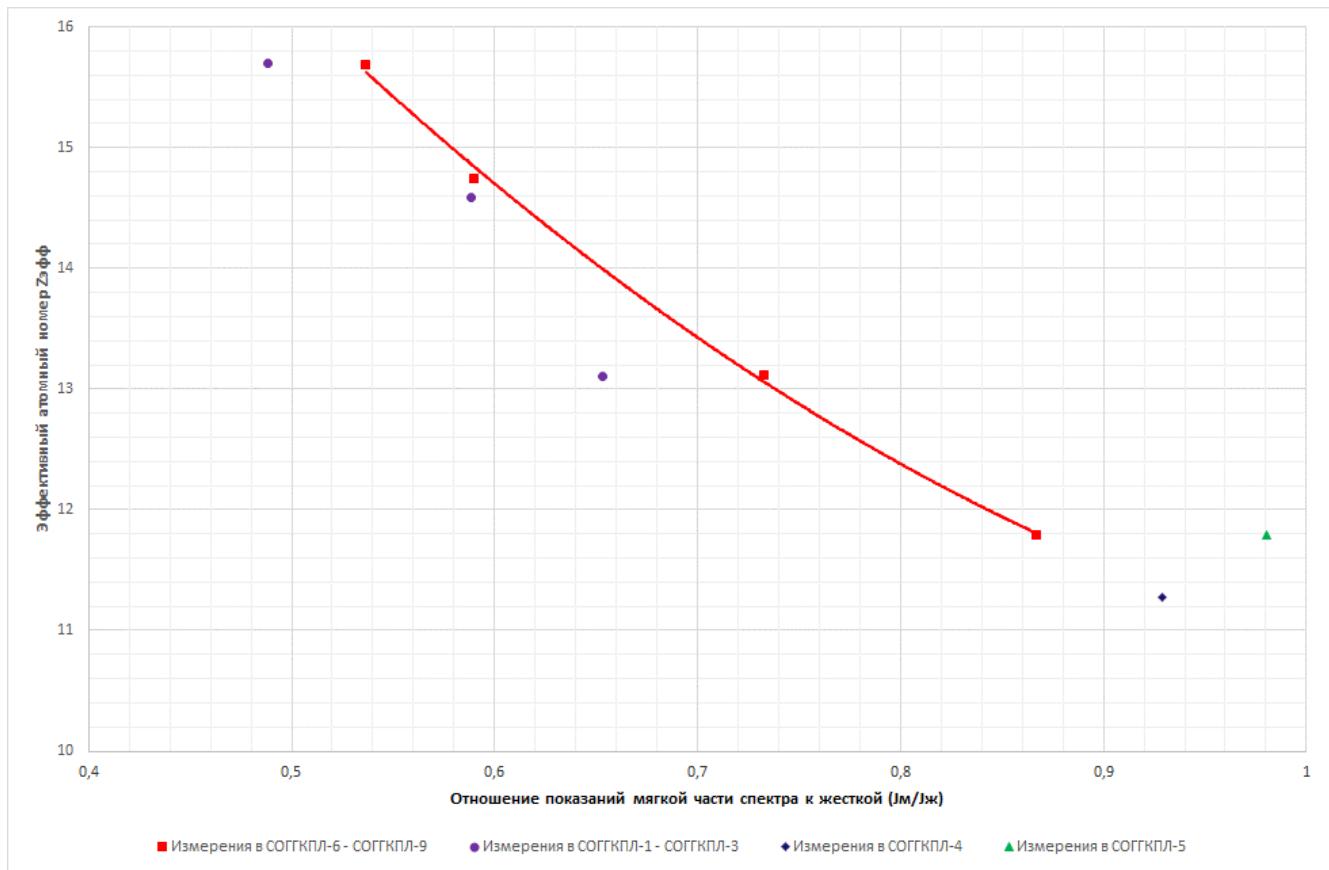


Рис. 2.5. Пример построения функции преобразования для расчета $Z_{\text{эфф}}$ по результатам измерений аппаратурой ГГК2-ЛП.

По результатам измерений в стандартных образцах с одинаковой плотностью и разными $Z_{\text{эфф}}$ для аппаратуры ГГК2-ЛП была построена основная зависимость для определения $Z_{\text{эфф}}$. Как и в предыдущем случае зависимость описывается квадратичной функцией. Но чувствительность параметра $Z_{\text{эфф}}$ к плотности гораздо больше и составляет 0,6-0,7 абсолютных единиц. Следует отметить, что характер расположения точек с плотностями отличными от $2200 \text{ кг}/\text{м}^3$ говорит о неком параллельном сдвиге основной зависимости для других плотностей породы. В данном случае, влияние плотности породы учитывается путем введения поправки.

Приведенные примеры построения основной зависимости для определения эффективного атомного номера для различных типов аппаратуры подтверждают необходимость оценки влияния плотности породы на $Z_{\text{эфф}}$. Учет влияния может быть решен различными способами, как в случае аппаратуры ЗГКЛП влияние плотности породы решено путем оптимизации длины литологического зонда, во втором случае учет влияния решен путем введения математической поправки.

2.8. Оценка влияния геометрии стандартных образцов на результаты измерений аппаратурой плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа

Для оценки влияния геометрии образцов на результаты определения плотности и эффективного атомного номера горных пород проведены расчеты параметров СОГГК-ЛП по результатам измерений аппаратурой плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа с использованием двух градуировочных зависимостей, одна из которых получена на стандартных образцах в виде полупластов, другая на стандартных образцах в виде моделей, пересеченных скважиной (полноразмерные стандартные образцы) рисунок 2.8.

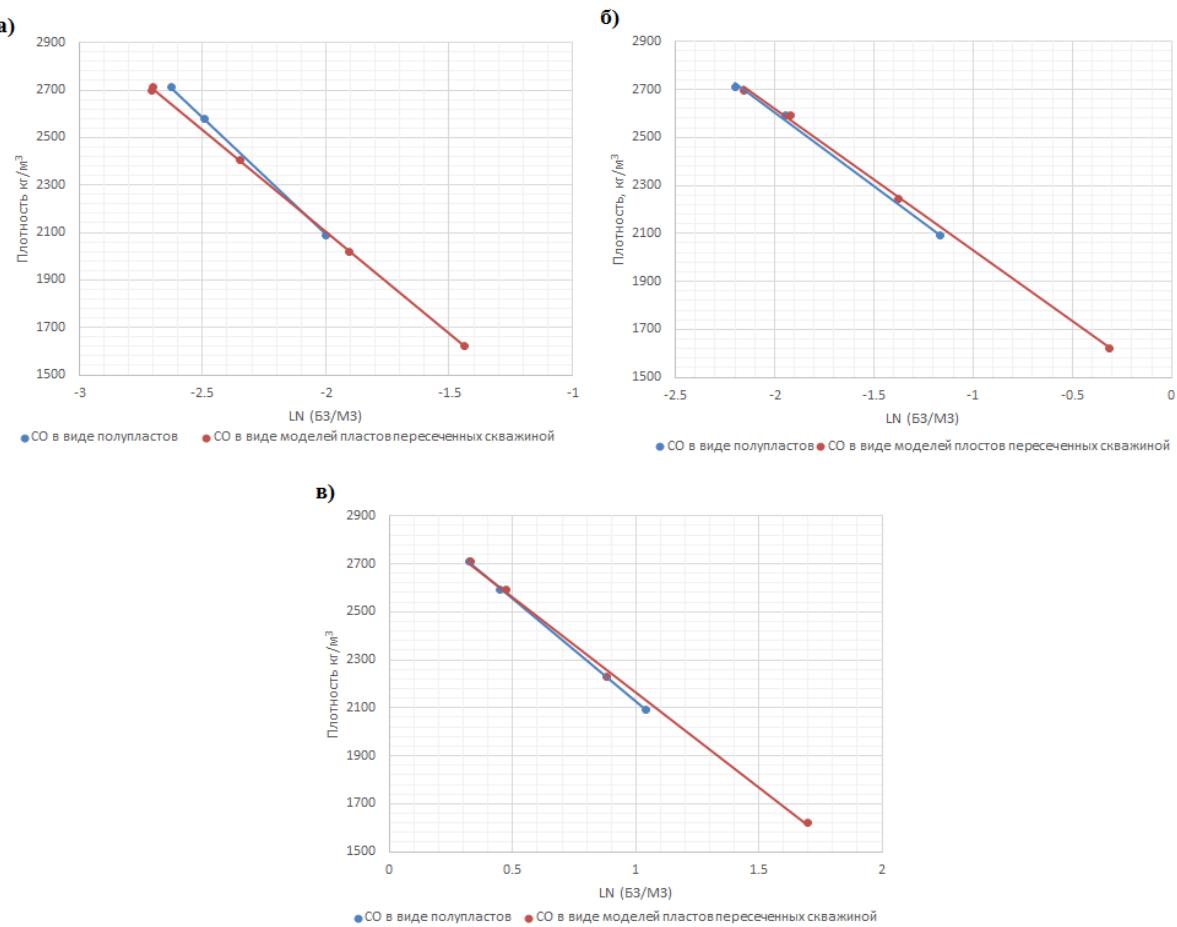


Рис. 2.8. Влияние геометрии образцов на вид основной градуировочной зависимости для определения плотности на аппаратуру различного типа, где
Ось X – натуральный логарифм отношения скорости счета (имп/мин) в канале большого зонда к малому.

Ось Y – плотность образцов.

Из приведенных диаграмм видно, что геометрия образцов по-разному влияет на градуировочные зависимости аппаратуры различных типов. На диаграмме (а) градуировочные зависимости пересекаются в точке с плотностью $\sim 2100 \text{ кг}/\text{м}^3$, при этом различие показаний в единицах плотности на краях диапазона измерений достигает $100 \text{ кг}/\text{м}^3$. На диаграммах (б, в) при высоких значениях плотности градуировочные зависимости практически совпадают, но при уменьшении плотности они расходятся и уже в диапазоне плотности $2100 \text{ кг}/\text{м}^3$ их расхождение достигает $\sim 50 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Для оценки влияния геометрии образцов на градуировочные зависимости для определения эффективного атомного номера горных пород так же были проведены измерения в СОГГК-ЛП в виде моделей пластов, пересеченных скважиной, и стандартных образцах в виде полупластов. На рисунке 2.9. приведен вид основных зависимостей для аппаратуры литоплотностного гамма-гамма каротажа, полученных на стандартных образцах в виде полупластов и стандартных образцах в виде моделей пластов, пересеченных скважиной.

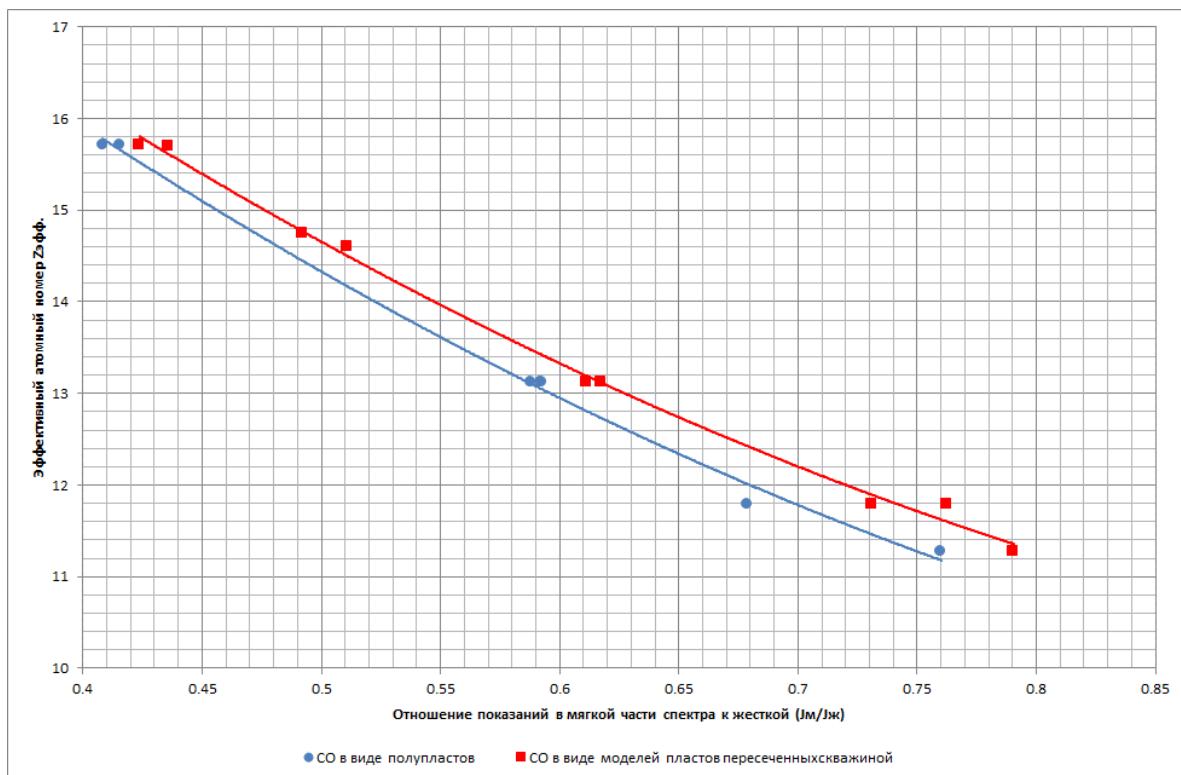


Рис. 2.9. Влияние геометрии образцов на вид основной градуировочной зависимости для определения эффективного атомного номера.

Из диаграммы видно, что отличие градуировочных зависимостей во всем диапазоне $Z_{\text{эфф}}$ составляет $\sim 0,3\text{-}0,4$ абсолютных единиц.

Таким образом, показано, что при использовании градуировочных зависимостей, полученных на полупластах, имеет место некая систематическая ошибка, вызванная несоответствием условий калибровки условиям скважинных измерений, что в итоге негативно скажется при их обработке.

2.9. Повышение эффективности метрологического обеспечения аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа

Описанный комплект стандартных образцов плотности и эффективного атомного номера горных пород, включающий девять стандартных образцов, требует для его размещения площади не менее 20m^2 , которые не все метрологические участки могут себе позволить. Тем более такой номенклатурный перечень образцов необходим только на этапе получения 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.

Для такой цели автором была предложена конструкция метрологической установки (рисунок 2.6.) для аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа, содержащая в одном корпусе три стандартных образца в виде моделей пластов, пересеченных скважиной, воспроизводящих, с требуемой

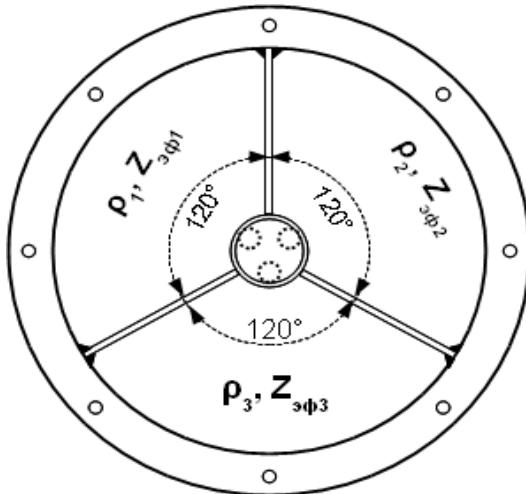


Рис. 2.6. Метрологическая установка для калибровки аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа, воспроизводящая три значения плотности и эффективного атомного номера горных пород [58].

точностью, 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 [58, 59, 60]. В корпусе радиально установлены три вертикальные перегородки, герметично соединенные со стенкой корпуса, его днищем 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.

Из номенклатуры комплекта СОГГК-ЛП подходящими параметрами, перекрывающими диапазон измерения плотности и эффективного атомного номера, обладают образцы под номерами 3, 5, 9 (таблица 6).

В каждой из секций в соответствии с п.1.1. были засыпаны стандартные образцы с соответствующими параметрами.

Воспроизводимые значения параметров экспериментальной установки такой конструкции приведены в таблице 10.

Таблица 10. Параметры, воспроизводимые экспериментальной установкой.

№ секции	Состав	Плотность, кг/м ³	Z _{эфф}
1	CaCo3, SiO2, вода	2410	14,61
2	SiO2, воздух	1625	11,79
3	SiO2, CaCo3, воздух	2250	15,71
2*	BaSO4, CaCo3, 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 10). 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, ГГК-ЛП, которые предварительно были откалиброваны на стандартных образцах СОГГК-ЛП.

Полученные данные, приведенные на (рисунок 2.7.), убедительно показывают, что такая метрологическая установка полностью отвечает предъявляемым к ней требованиям:

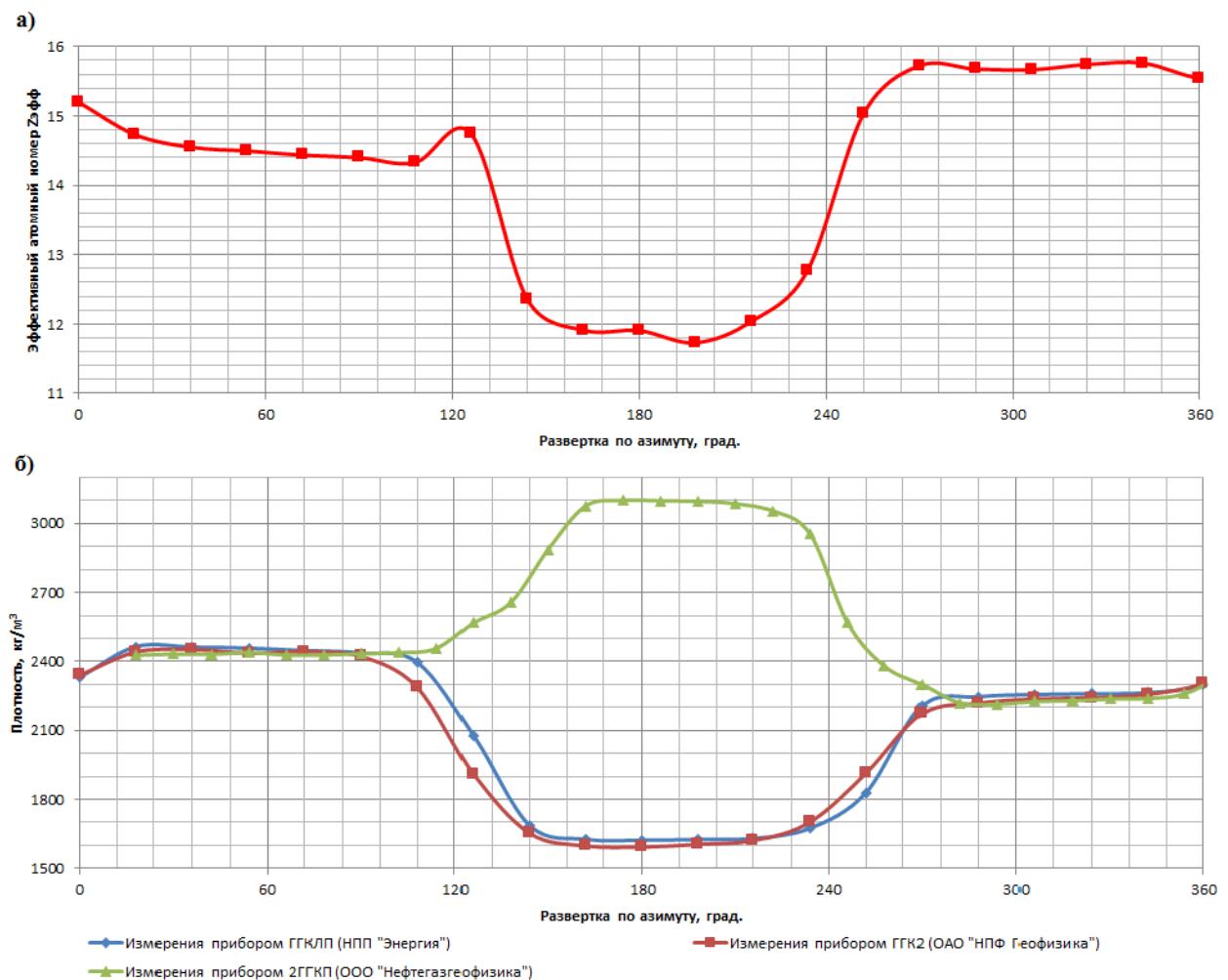


Рис. 2.7. а) оценка азимутальной неоднородности по параметру $Z_{\text{эфф}}$

б) оценка азимутальной неоднородности по плотности ρ

- размеры стандартных образцов обеспечивают 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 перегородок;

- измеренные значения плотности и эффективного атомного номера горных пород в однородных участках секций № 1 и № 3 не зависят от свойств материала, заполняющего противоположную секцию.

Такая конструкция метрологической установки для аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа, позволяет снизить затраты на изготовление стандартных образцов, уменьшает в трое радиационную нагрузку при проведении калибровки, а также снижает время, затрачиваемое на калибровку.

Выводы по главе 2

По результатам исследований, описанным во второй главе, можно сделать следующие выводы:

- разработанные в качестве первичного эталона плотности и эффективного атомного номера горных пород стандартные образцы СОГГК-ЛП позволяют проводить калибровку и градуировку плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа с учетом влияния аттестованных параметров друг на друга;
- расчет нормировочного параметра при определении плотности по совокупности всех образцов, участвующих в калибровке, повышает точность скважинных измерений;
- разработанная метрологическая установка для калибровки аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа, в состав которой входит три стандартных образца плотности и эффективного атомного номера, позволяет значительно снизить затраты на изготовление, уменьшить радиационную нагрузку при проведении калибровки, значительно уменьшить занимаемое место;
- оценка влияния геометрии стандартных образцов, на которых выполнена калибровка аппаратуры плотностного и литоплотностного гамма-гамма каротажа, показала, что измерения обработанные по результатам калибровки выполненной на образцах, в виде полупластов, имеют систематическую ошибку, что объясняется не соответствием образцов реальным условиям измерений.

3. РАЗРАБОТКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АППАРАТУРЫ ПО ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБСАЖЕННЫХ СКВАЖИН ГАММА-ГАММА МЕТОДОМ

3.1. Особенности конструкции метрологической установки для аппаратуры контроля технического состояния обсаженных нефтяных и газовых скважин

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

Разработанная при участии автора 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) [61, 62, 63, 64].

Скважина и около скважинное пространство имитируется парой блоков (рисунок 3.1.). 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 пары таких блоков, каждая из которых воспроизводит определенное значение плотности: 1000, 1590, 1980, 2410 кг/м³.

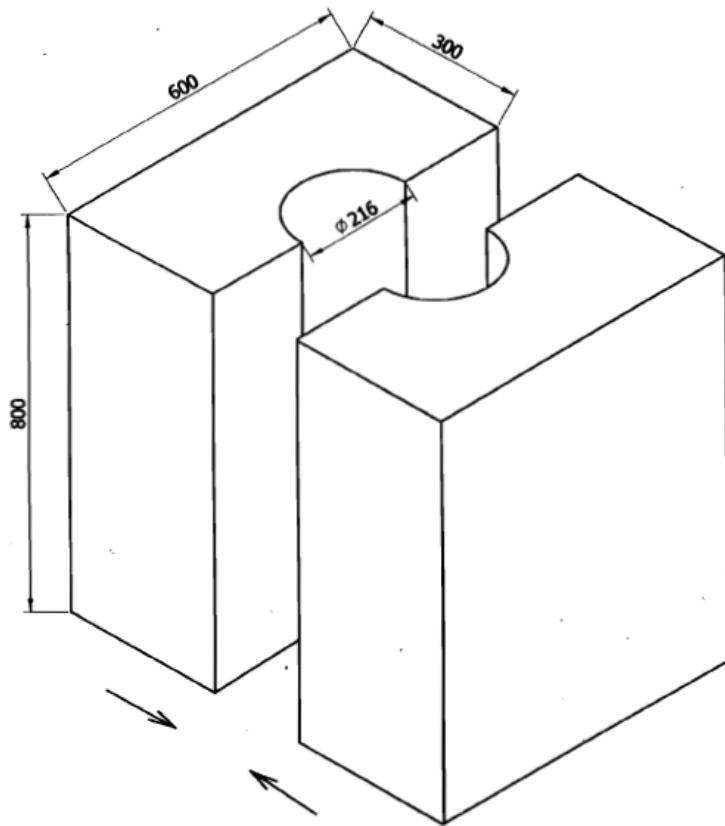


Рис. 3.1. Внешний вид блоков [61, 62]

Колонна с цементным кольцом представляет собой сменную вставку (рисунок 3.2.). Колонны имеют различные толщины стенок и плотности цемента. Цементное кольцо может быть, как эксцентричным, так и центрированным относительно оси колонны.

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 $\varnothing 146$ мм. и четыре колонны с внешним диаметром $\varnothing 168$ мм.

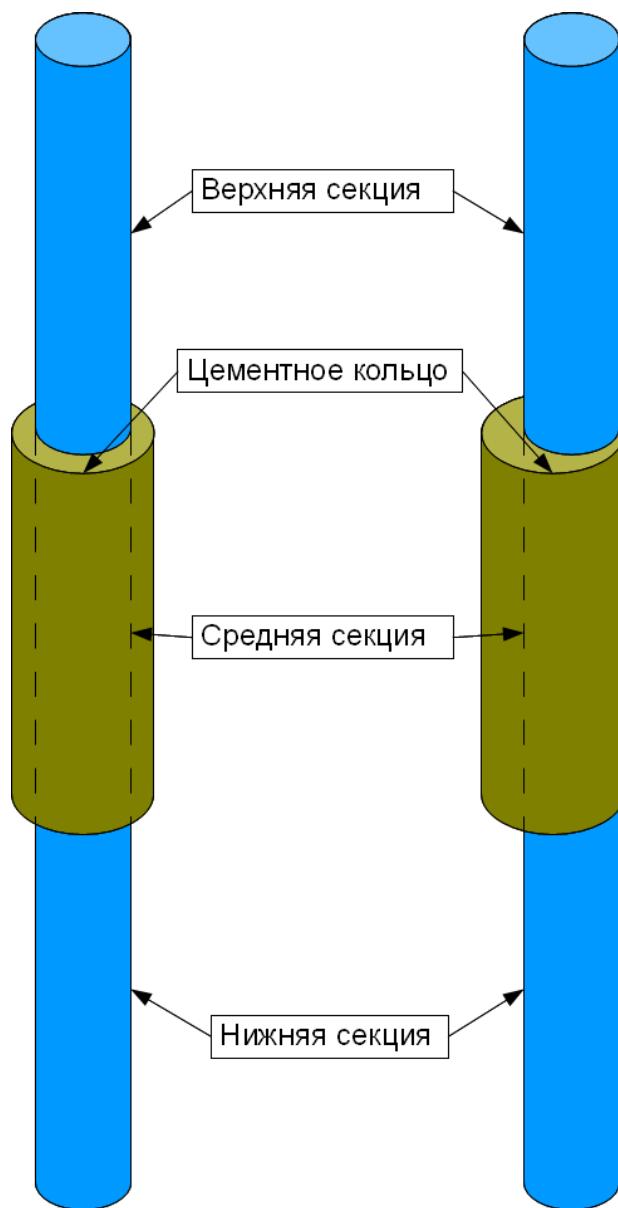


Рис.3.2. Конструкция обсадных колонн

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

Толщины стенок стальных колонн определялись путем измерения внутреннего диаметра индикаторным нутромером (класс точности 0,01мм) и внешнего - электронным штангенциркулем (класс точности 0,05 мм.). Измерения выполнялись в середине труб по их длине в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Результаты измерений приведены в таблице 11.

Таблица 11. Результаты определения толщины стенки обсадных колонн.

№ кол.	Диаметр наружный, мм			Диаметр наружный, мм			Толщина стенки, мм		
	D ₁	D ₂	D _{ср}	D ₁	D ₂	D _{ср}	H ₁	H ₂	H _{ср}
1	145,87	145,88	145,88	130,15	130,16	130,16	7,86	7,86	7,86
2	145,86	145,85	145,86	130,15	130,13	130,14	7,86	7,86	7,86
3	145,83	145,83	145,83	130,35	130,33	130,34	7,74	7,75	7,75
4	145,8	145,78	145,79	130,16	130,15	130,16	7,82	7,82	7,82
5	145,87	145,86	145,87	128,23	128,23	128,23	8,82	8,82	8,82
6	145,78	145,75	145,77	134,12	134,09	134,11	5,83	5,83	5,83
7	145,83	145,83	145,83	130,35	130,33	130,34	7,74	7,75	7,75
8	145,83	145,83	145,83	130,35	130,33	130,34	7,74	7,75	7,75
9	145,83	145,83	145,83	130,35	130,33	130,34	7,74	7,75	7,75
10	165,8	165,79	165,80	148,25	148,25	148,25	8,78	8,77	8,77
11	165,85	165,85	165,85	148,2	148,2	148,20	8,83	8,83	8,83
12	165,87	165,85	165,86	144,2	144,21	144,21	10,84	10,82	10,83
13	165,87	165,88	165,88	153,08	153,06	153,07	6,40	6,41	6,40

Цементное кольцо для каждого экземпляра обсадной трубы заливалось цементным раствором, приготовленным за один замес. Для определения плотности цементного камня из каждого замеса раствора в процессе его заливки в обечайку отбиралось по три пробы, которые заливались в специальные контейнеры, выточенные из капролона. Контейнеры имеют форму усеченного конуса, основания которого после заполнения раствором заглушались винтовыми крышками для предотвращения потери влаги в процессе затвердевания цемента. (Отмечу, что такой же режим затвердевания создавался и для раствора в обечайке образца зацементированной колонны: сразу после заполнения обечайки сверху заливался тонкий слой клея ПВА и она заглушалась сверху текстолитовой пробкой на герметике).

Примерно через 15 ч после заливки крышки контейнеров снимались, и торцы

образцов, с помощью шлифовальной бумаги доводились до размера контейнера. После этого, взвешиванием определялась масса образцов брутто и масса тары. По этим данным вычислялась масса и плотность образцов.

Характеристики контейнеров (линейные размеры, объем и масса) определялись индивидуально и приведены в таблице 12.

Таблица 12. Характеристики контейнеров.

№	D, мм	d, мм	H, мм	V _к , см ³	M, г *
1	50.4	47.7	200.4	378.77	211.5
2	50.2	47.5	200.0	374.94	214.0
3	50.5	47.0	200.5	374.40	216.5

Приведенные значения массы контейнеров получены сразу после их изготовления. Перед каждой заливкой цементной смеси контейнеры взвешивались. Измерения масс проб проводились электронными весами с погрешностью 0,5 г. Линейные размеры контейнеров определялись штангенциркулем с погрешностью 0,1мм. В таблице 13. приведены результаты определения плотности цементных смесей, из которых изготавливались цементные кольца обсадных колонн.

Таблица 13. Результаты определения плотности контрольных образцов.

№ кол.	№ пробы	Масса брутто, г	Масса контейнера, г	ρ ₁ , кг/м ³	ρ _{ср} , кг/м ³
1	1	956,5	213,5	1962	1967
	2	954,5	216,5	1968	
	3	955,5	217,5	1971	
2	1	949,0	211,5	1947	1948
	2	943,0	214,0	1944	
	3	948,0	216,5	1954	
3	1			1000	1000
	2			1000	
	3			1000	

Продолжение таблицы 13.

№ кол.	№ пробы	Масса брутто, г	Масса контейнера, г	ρ_1 , кг/м ³	ρ_{cp} , кг/м ³
4	1	794,5	213,5	1534	1535
	2	791,0	217,0	1531	
	3	794,0	217,5	1540	
5	1	951,5	211,5	1954	1963
	2	952,0	214,0	1968	
	3	951,5	215,5	1966	
6	1	955,5	212,5	1962	1963
	2	950,5	215,5	1960	
	3	953,0	216,5	1967	
7	1			1000	1000
	2			1000	
	3			1000	
8	1	763,5	213,5	1452	1450
	2	757,5	217,0	1442	
	3	763,0	217,5	1457	
9	1	913,5	213,5	1848	1847
	2	909,0	216,0	1848	
	3	907,5	216,5	1846	
10	1	960,5	213,0	1973	1969
	2	949,5	216,0	1956	
	3	957,0	216,5	1978	
11	1	808,5	213,5	1571	1571
	2	804,5	216,5	1568	
	3	806,5	217,5	1573	
12	1	958,0	213,0	1967	1968
	2	951,0	216,0	1960	
	3	956,5	216,5	1976	
13	1	957,5	213,5	1964	1967
	2	953,5	216,5	1966	
	3	955,5	217,0	1972	

Значения плотности определялись по формуле:

$$\rho = \frac{\text{Масса брутто} - \text{Масса контейнера}}{V_k}; \quad (13)$$

Где, V_k – объем соответствующего контейнера.

Аттестованные значения толщины стенки колонны (H) и плотности цементного камня приведены в таблице 14

Таблица 14. Аттестованные значения толщины стенки колонны и плотности цементного камня.

№ кол.	D мм	H, мм	Цементное кольцо	
			Плотность кг/см³	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 3.3. представлено схематическое изображение калибровочной установки в сборе.

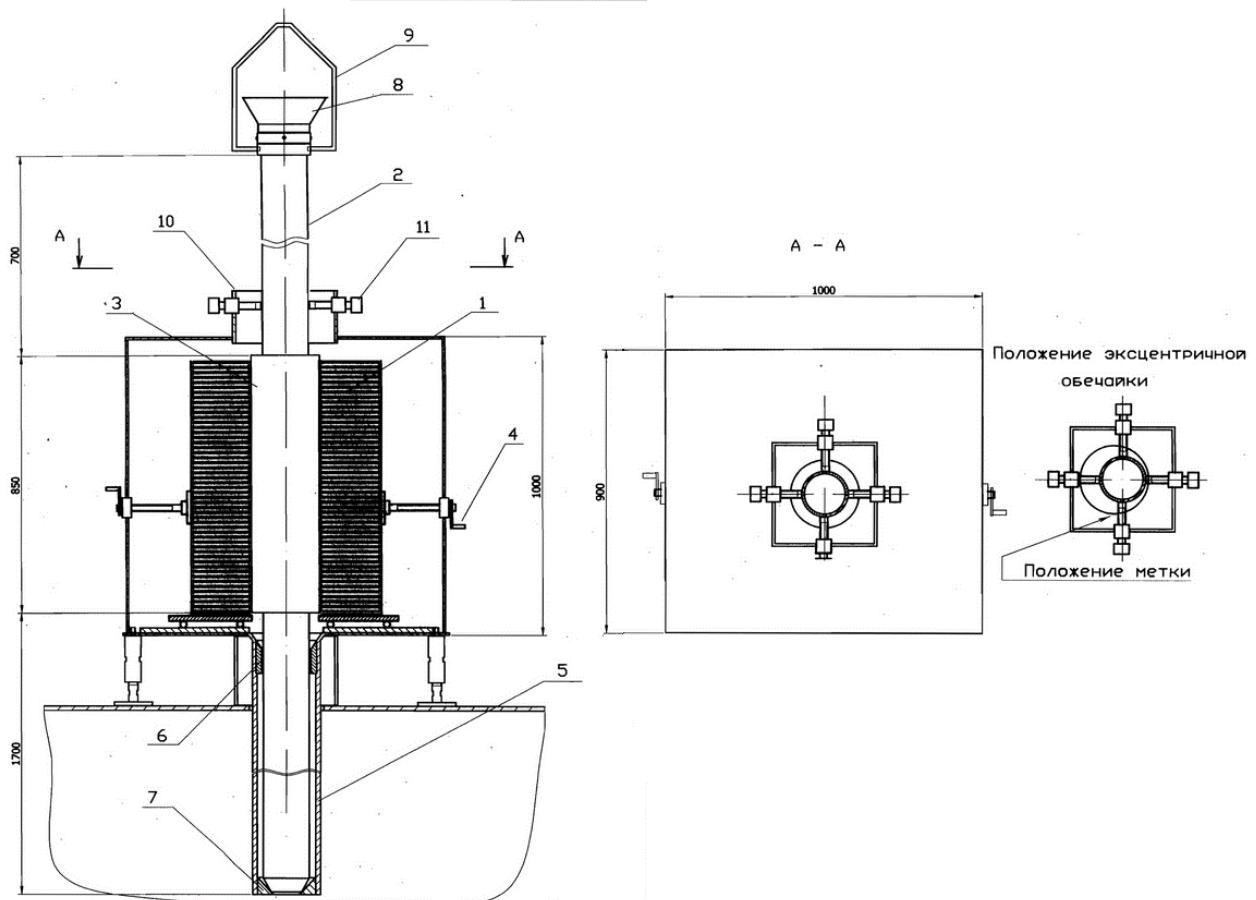


Рис. 3.3. Калибровочная установка. Общий вид [61, 62].

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 серьга; 10-горловина; 11-съемные винты центровки

3.1.1. Подготовка установки к измерениям и проведение измерений

Сменные вставки (обсадные колонны с цементным кольцом) должны размещаться каждая в своем маркованном депо и быть заполнены до должного уровня промывочной жидкостью с ингибирующими добавками.

Для установки вставки в рабочее положение необходимо:

- максимально раздвинуть блоки, воспроизводящие плотность породы;
- установить в зумпф центрирующий вкладыш, соответствующий устанавливаемой колонне;
- при помощи тельфера поместить колонну в калибровочную установку;

- придвинуть правый и левый блоки до соприкосновения блоков вертикальными гранями;
- зафиксировать положение колонны на горловине при помощи центрирующих винтов.

После установки колонны в калибровочную установку, в соответствии с руководством по эксплуатации на скважинный прибор, подсоединить прибор к геофизическому кабелю и подключить к регистрирующему комплексу. Подвесить прибор на тельфере и непосредственно перед спуском в колонну зарядить в прибор источник гамма-квантов. Опустить прибор в колонну таким образом, чтобы источник гамма-квантов находился не менее чем в 50 мм от нижнего торца цементного кольца колонны (рисунок 3.4.).

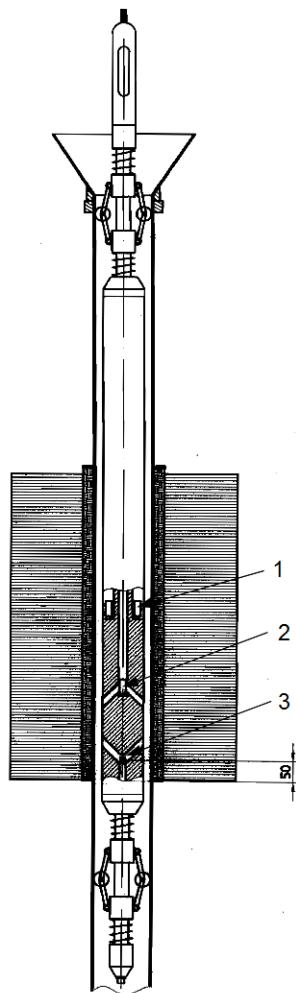


Рис. 3.4. Размещение скважинного прибора в калибровочной установке[59].

1-блоки, воспроизводящие плотность породы; 2-обсадная колонна;

3-цементное кольцо

Перед проведением измерений необходимо, как можно точнее, установить и отметить расположение детекторов большого зонда на внешней поверхности корпуса прибора, пронумеровать по порядку. При проведении измерений в колоннах с эксцентричным расположением цементного камня необходимо первый детектор большого зонда установить напротив тонкого слоя цементного камня. В случае если измерения проводятся с целью получения градуировочной зависимости для приборов конкретного типа, и с целью снижения случайной составляющей погрешности, а также возможной неоднородности образцов, в каждой колонне-вставке необходимо провести столько повторных измерений, сколько детекторов установлено в канале большого зонда, причем при каждом последующем повторе прибор необходимо поворачивать вокруг своей оси, таким образом, чтобы соседний детектор устанавливался напротив тонкого слоя цементного камня. В итоге должны быть результаты измерений каждым из детекторов большого зонда на тонком слое цемента. При проведении измерений в режиме плановой калибровки достаточно трех повторных измерений с поворотом прибора вокруг своей оси на 120°.

Одним из наиболее важных этапов первичной обработки результатов измерений является привязка всех повторных измерений по азимуту к первому измерению (рисунок 3.5.)

На рисунке показан пример увязки результатов повторных измерений в колонне с эксцентричным расположением цементного камня для аппаратуры СГДТ-НВ. Процедуру увязки при измерениях в центрированных колоннах проводить не нужно.

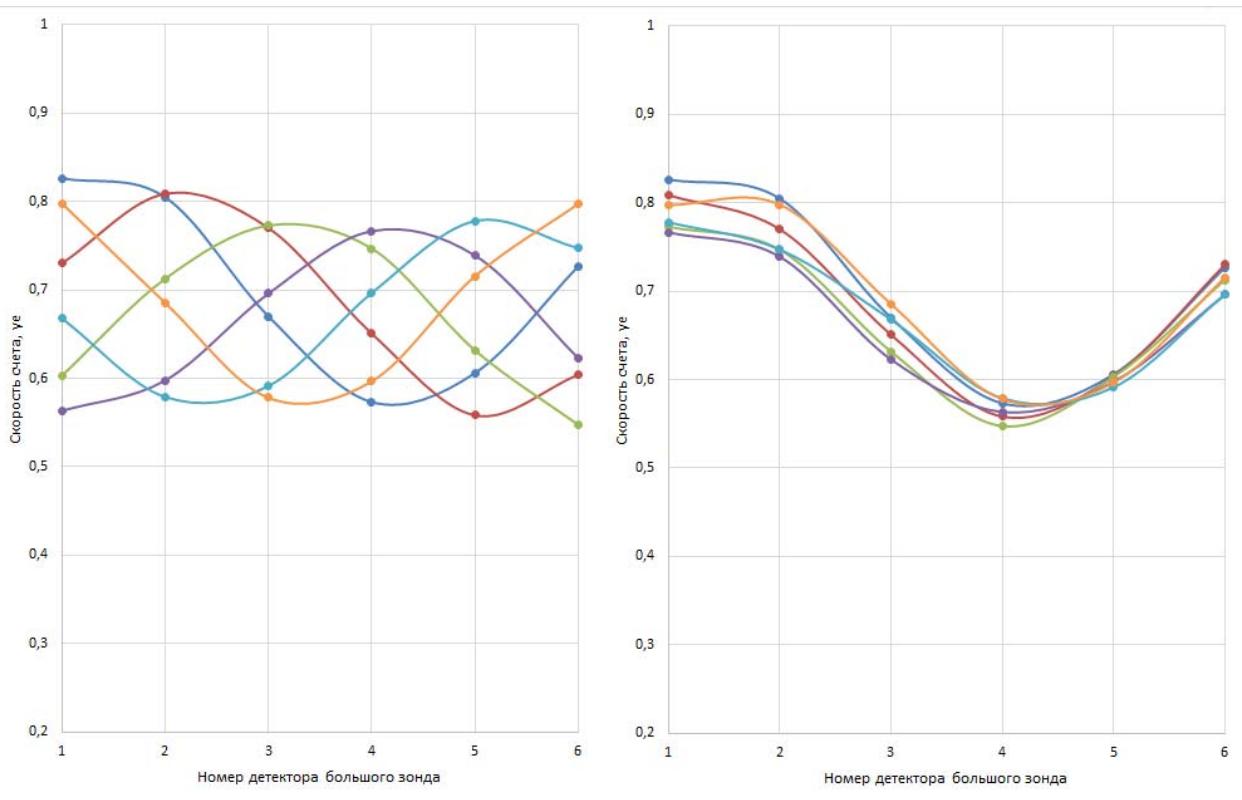


Рис. 3.5. Привязка повторных измерений к первому.
с лева – исходные не увязанные результаты измерений
с права – результаты измерений, увязанные к тонкому слою цемента

После увязки проводится осреднение результатов измерений по каждому детектору. Дальнейшая процедура обработки описана ниже.

3.2. Исследование влияния различных факторов на показания аппаратуры СГДТ-НВ

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.

Автором был проведен полный спектр метрологических испытаний для аппаратуры СГДТ-НВ с использованием калибровочной установки. Основные метрологические характеристики аппаратуры не отличаются от других типов аппаратуры и приведены в первой главе. Большой зонд представлен шестью детекторами NaJ размерами 16×40 , расположенными равномерно по периметру корпуса прибора и коллимированными в азимутальном направлении. На рисунке 3.6. показана схематическая геометрия скважинных измерений аппаратурой СГДТ-НВ.



Рис. 3.6. Геометрия скважинных измерений аппаратурой типа СГДТ-НВ.

Для оценки чувствительности зондов аппаратуры СГДТ-НВ к различным факторам были проведены измерения во всех эталонных обсадных колоннах (таблица 14) 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.

Первые исследования по оценке чувствительности зондов аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом к различным параметрам частично исследованы в работах [22, 46]. Однако, проведенные в этих работах исследования не в полной мере соответствуют нынешним требованиям к результатам и условиям измерений.

Приведенные ниже результаты исследований, выполненные автором, направлены на переход от качественной к количественной интерпретации результатов скважинных измерений аппаратурой типа СГДТ.

Для оценки чувствительности зондов на изменение толщины стенки колонны H_k использовались результаты измерений в колоннах №№ 2, 5, 6 (см. таблицу 14) при различных плотностях породы.

На рисунке 3.7. показана чувствительность показаний малого и большого зондов к изменению толщины стенки обсадной колонны. Из рисунка видно, что при увеличении толщины стенки на $\sim 2,5$ мм скорость счета на обоих зондах уменьшается в среднем в полтора раза.

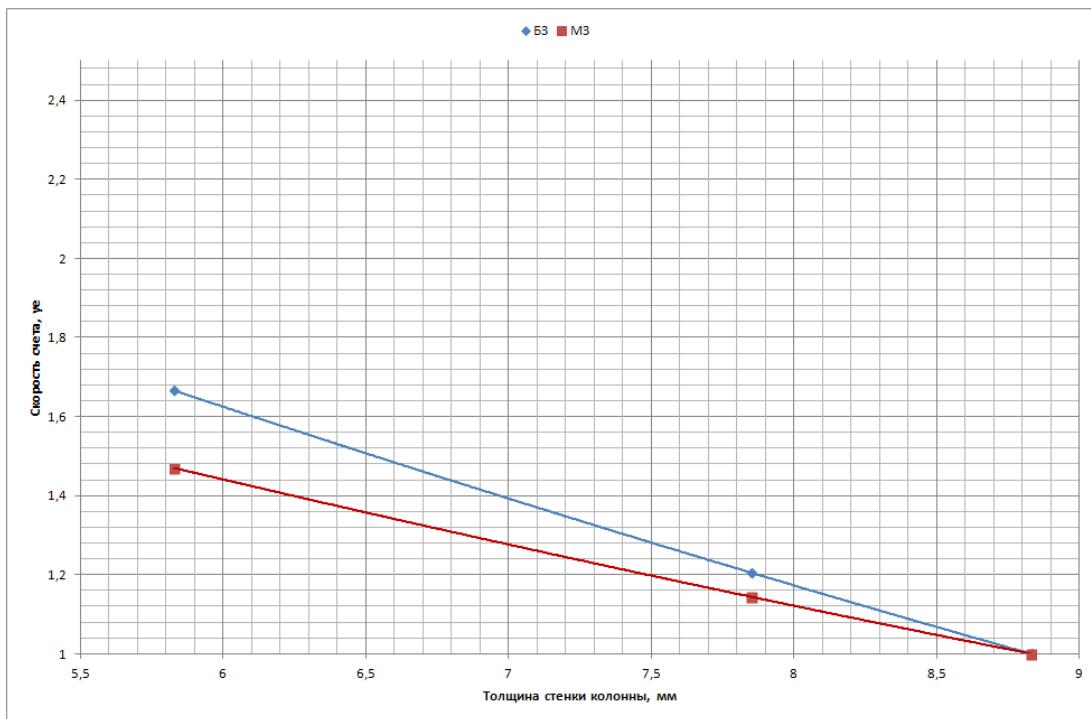


Рис. 3.7. Зависимость показаний малого и большого зондов от толщины стенки стальной колонны[60].

Для оценки чувствительности зондов к плотности цементного камня $\rho_{ц}$ использовались результаты измерений в колоннах №№ 2, 3, 4 (см. таблицу 14) при различных плотностях породы.

На рисунке 3.8. приведена зависимость показаний малого и большого зондов от плотности цементного камня в колонне при фиксированной толщине стенки колонны и плотности породы $R_p=1980 \text{ кг}/\text{м}^3$ и $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$.

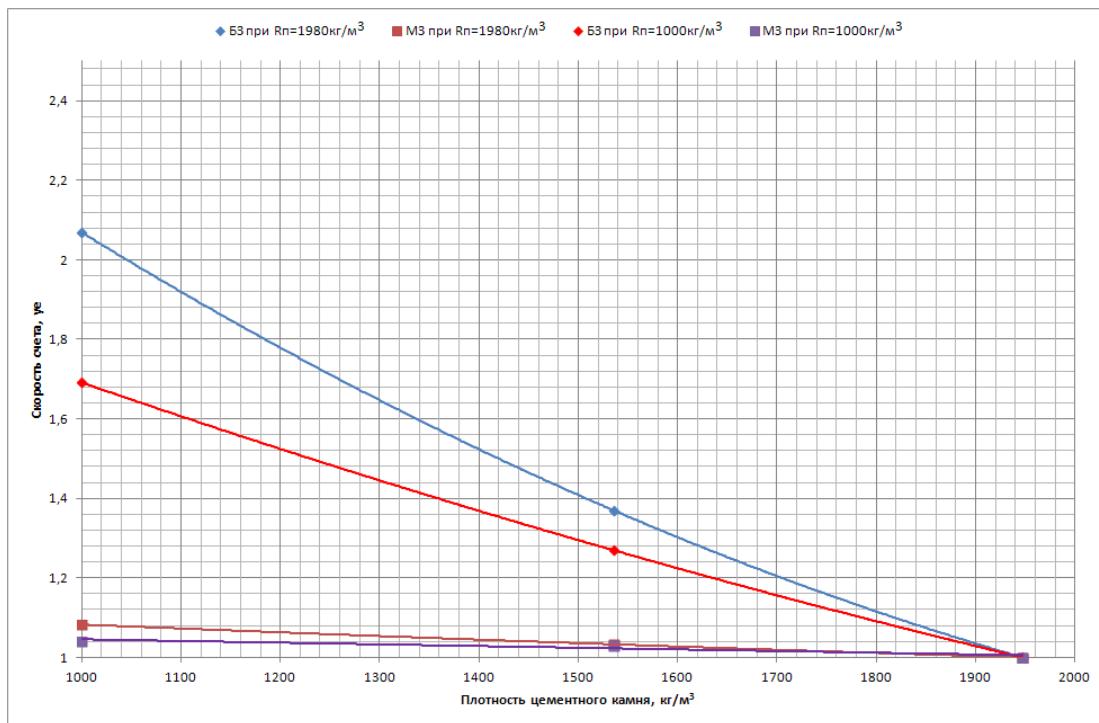


Рис. 3.8. Зависимость показаний малого и большого зондов от плотности цементного камня[60].

Видно, что при изменении плотности цементного камня $\rho_{ц} \sim 1000$ кг/м³, малый зонд практически не чувствителен к плотности цементного камня: дифференциация не превышает 1,1. Чувствительность большого зонда в том же диапазоне изменения плотности цементного камня составляет 1,7 при плотности породы 1000 кг/м³ и 2,1 при плотности породы 1980 кг/м³.

Из приведенных результатов видно, что чувствительность большого зонда к изменению толщины стенки и плотности цементного камня практически одинаковы. Отсюда можно предположить, что чувствительность большого зонда к плотности породы будет соизмерима с чувствительностью к плотности цементного камня.

На рисунке 3.9. представлено сопоставление чувствительности большого зонда к изменению плотности цементного камня и плотности породы, из которого видно, что показания большого зонда характеризуются примерно одинаковой чувствительностью 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 $\sim 300\text{-}400 \text{ кг}/\text{м}^3$ показания большого зонда изменятся так, как при этом изменилась плотность цемента на те же $300\text{-}400 \text{ кг}/\text{м}^3$. Это указывает на то, что для корректного определения плотности цементного камня необходимо учитывать плотность горной породы. Из представленных графиков видно, что поправка за влияние плотности горной породы представляет некую линейную функцию.

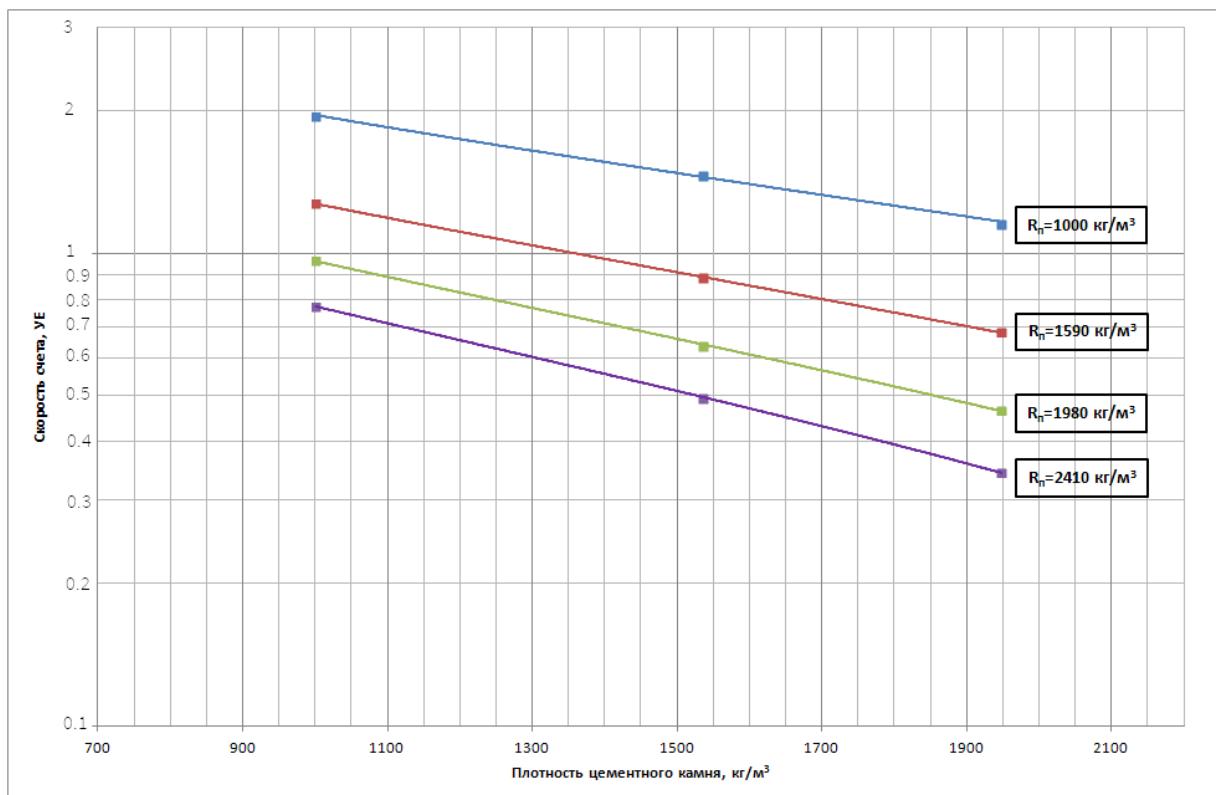


Рис. 3.9. Сопоставление чувствительности показаний большого зонда к изменению плотности цементного камня и плотности породы.

Шесть детекторов большого зонда, аппаратуры СГДТ-НВ, позволяют оценивать эксцентриситет обсадной колонны относительно оси скважины. На рисунке 3.10. представлены результаты измерений в колоннах №№ 1,2 (Таблица 14.) при плотности породы $\rho_p 1580 \text{ кг}/\text{м}^3$ (а) и $\rho_p 1980 \text{ кг}/\text{м}^3$ (б). Колонны №1 и №2 отличаются друг от друга только эксцентриситетом колонны. При разности плотности породы и плотности цемента $\sim 400 \text{ кг}/\text{м}^3$ в колонне с эксцентриситетом различие между показаниями детекторов большого зонда достигают 40%. При

меньшей разности $\sim 30 \text{ кг}/\text{м}^3$, показания в эксцентричной колонне и центрированной практически не отличаются. Из приведенных результатов можно сделать вывод, что чем больше дифференциация между плотностью породы и плотности цементного кольца, при наличии эксцентризитета колонны, тем выше возможность выявления эксцентризитета. При небольшой разнице плотности породы и плотности цемента возможность выявления эксцентризитета снижается.

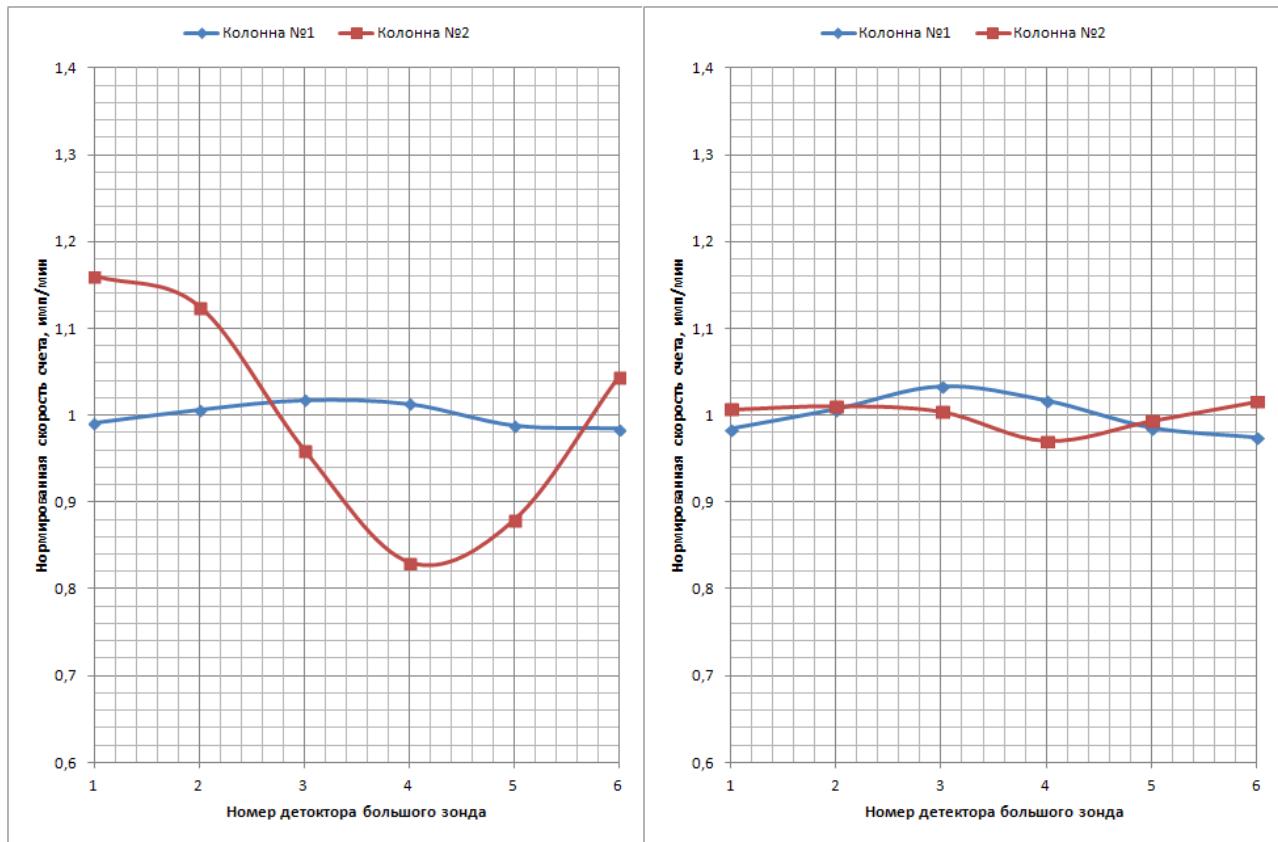


Рис. 3.10. Влияние эксцентризитета колонны на показания детекторов большого зонда(БЗ) аппаратуры СГДТ-НВ

- a** – показания детекторов БЗ в колонне с эксцентризитетом (Колонна №2) и без (Колонна №1) при разности плотности породы и плотности цемента $\sim 400 \text{ кг}/\text{м}^3$.
- б** – показания детекторов БЗ в колонне с эксцентризитетом (Колонна №2) и без (Колонна №1) при разности плотности породы и плотности цемента $\sim 30 \text{ кг}/\text{м}^3$.

3.3. Построение функции преобразования для расчета толщины стенки обсадной колонны и плотности заколонного пространства

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.

Как было показано в предыдущем разделе, показания малого зонда в основном зависят от толщины стенки обсадной колонны, показания большого зонда зависят от всех исследуемых влияющих факторов. Если влияние толщины стенки обсадной колонны можно учесть за счет показаний малого зонда, то влияние плотности породы можно учесть только при привлечении дополнительных данных характеризующих плотность горной породы.

Типично основная зависимость для определения толщины стенки обсадной колонны и плотности цементного камня представляет собой систему из двух линейных уравнений [45]:

$$\begin{cases} R_{\text{ц}} = A_1 + B_1 * \ln\left(\frac{J_{\text{БЗ}}}{J_{\text{БЗ}}^{\text{эт}}}\right) + C_1 * \ln\left(\frac{J_{\text{МЗ}}}{J_{\text{МЗ}}^{\text{эт}}}\right) \\ H_{\text{к}} = A_2 + B_2 * \ln\left(\frac{J_{\text{БЗ}}}{J_{\text{БЗ}}^{\text{эт}}}\right) + C_2 * \ln\left(\frac{J_{\text{МЗ}}}{J_{\text{МЗ}}^{\text{эт}}}\right) \end{cases} \quad (14)$$

где

R_ц, H_к – плотность цементного камня и толщина стенки соответственно;

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

J^{эт} – скорости счета зарегистрированные в эталонной среде;

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

По результатам измерения во всех колоннах (таблица 14) при плотности породы 2410 кг/м³, методом наименьших квадратов, была решена система уравнений (14) для колонн диаметром 146 и 168 мм. и найдены коэффициенты А, В, С. В таблице 15 приведены исходные результаты измерений.

Таблица 15. Результаты измерения в колоннах.

Внешн. диам. кол.	№ п. п.	Н _к , мм	ρ _ц , кг/м ³	B31, имп/ мин	B32, имп/ мин	B33, имп/ мин	B34, имп/ мин	B35, имп/ мин	B36, имп/ мин	Инт., имп/ мин	M3 (Тлш), имп/ мин
				Эталонная среда		82862	80173	79048	76915	78110	81446
Ø146мм.	1	7,86	1967	28310	26597	25691	24992	25997	27826	26569	97031
	2	7,85	1947	28452	27238	27024	26439	27314	28385	27475	98457
	3	7,74	1000	59934	58760	62274	63637	63336	61885	61638	106237
	4	7,82	1535	39866	38023	38723	39101	40213	40822	39458	102013
	5	8,83	1963	23850	22496	22288	21959	22908	24352	22975	85360
	6	5,83	1967	40227	37862	37478	37038	38789	41100	38749	125559
	7	7,74	1000	67808	65096	63663	61210	62493	66125	64399	105089
	8	7,74	1450	47249	45173	43936	41790	42862	45891	44483	102171
	9	7,74	1847	32337	31243	30846	29550	29734	31461	30862	99087
Ø168мм.	10	8,7	1968	14613	14000	13470	12848	13135	14179	13707	50700
	11	8,83	1570	18629	18026	17669	17167	17281	18128	17817	51975
	12	10,84	1967	10887	10358	9990	9670	9840	10579	10221	39421
	13	6,4	1967	21929	20946	20005	19227	19691	21216	20502	67508

В качестве эталонной среды приняты результаты измерений в колонне №1 при плотности породы 1000 кг/м³.

Для построения основной зависимости использовались показания малого зонда (М3) и средние значения показаний со всех детекторов большого зонда (Б3). Используя полученные зависимости выполнен расчет значений плотности цементного камня и толщины стенки обсадной колонны для каждого детектора большого зонда. В таблицах 16 и 17 приведены абсолютные значения погрешностей определения плотности цементного камня и толщины стенки колонны, рассчитанные по формулам:

$$\Delta \rho_{\text{ц}} = \rho_{\text{псп}} - \rho_{\text{изм}} \text{ кг/м}^3 \quad (15)$$

$$\Delta H_k = H_{\text{псп}} - H_{\text{изм}} \text{ мм} \quad (16)$$

Таблица 16. Погрешность определения плотности цементного камня.

Внешн. диаметр колонны	№ п.п.	Нк, мм.	$\rho_{\text{п.}}$, кг/м³	Б31, кг/м³	Б32, кг/м³	Б33, кг/м³	Б34, кг/м³	Б35, кг/м³	Б36, кг/м³	Инт., кг/м³
Ø146мм.	1	7,86	1967	16	-21	-47	-48	-17	16	-16
	2	7,85	1947	-23	-37	-29	-22	0	-4	-19
	3	7,74	1000	-162	-145	-54	8	-18	-100	-78
	4	7,82	1535	-71	-89	-48	-2	14	-19	-36
	5	8,83	1963	18	-14	-8	8	42	66	19
	6	5,83	1967	11	-24	-19	1	40	60	12
	7	7,74	1000	13	3	-7	-22	-16	3	-4
	8	7,74	1450	56	41	23	-5	7	41	28
	9	7,74	1847	27	25	27	7	-4	14	16
Ø168мм.	10	8,7	1968	6	-12	-58	-58	-82	-18	-36
	11	8,83	1570	1	1	-10	-13	-29	-18	-11
	12	10,84	1967	65	33	-8	-17	-14	43	18
	13	6,4	1967	70	46	-13	-36	-20	41	16

Таблица 17. Погрешность определения толщины стенки обсадной колонны.

Внешн. диаметр колонны	№ п.п.	Нк, мм.	$\rho_{\text{п.}}$, кг/м³	Б31, мм.	Б32, мм.	Б33, мм.	Б34, мм.	Б35, мм.	Б36, мм.	Инт., мм.
Ø146мм.	1	7,86	1967	-0,03	-0,01	0,01	0,01	-0,01	-0,03	-0,01
	2	7,85	1947	0,09	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,09
	3	7,74	1000	0,14	0,13	0,08	0,05	0,06	0,11	0,10
	4	7,82	1535	0,14	0,15	0,13	0,10	0,10	0,11	0,12
	5	8,83	1963	-0,06	-0,04	-0,05	-0,05	-0,07	-0,09	-0,06
	6	5,83	1967	-0,04	-0,02	-0,02	-0,04	-0,06	-0,07	-0,04
	7	7,74	1000	-0,04	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03
	8	7,74	1450	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01	-0,03	-0,02
	9	7,74	1847	-0,05	-0,05	-0,05	-0,04	-0,04	-0,05	-0,05
Ø168мм.	10	8,7	1968	-0,05	-0,04	0,00	0,00	0,02	-0,03	-0,02
	11	8,83	1570	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
	12	10,84	1967	-0,03	-0,01	0,03	0,03	0,03	-0,01	0,01
	13	6,4	1967	-0,04	-0,02	0,03	0,04	0,03	-0,01	0,00

По результатам обработки измерений каждого детектора большого зонда видно, что основная абсолютная погрешность определения плотности цементного камня, в среднем, не превышает $50 \text{ кг}/\text{м}^3$, погрешность определения толщины стенки колонны не превышает 0,1 мм. Достаточно высокие погрешности определения плотности цементного камня на некоторых детекторах, даже превышающие допустимую погрешность ($\pm 150 \text{ кг}/\text{м}^3$), получились только в эксцентричных колоннах №3 и №4 с высоким контрастом плотности цемента к плотности породы. В колоннах с аналогичным контрастом (№7 и №8) но с центрированным расположением цементного кольца, погрешности не превышают $50 \text{ кг}/\text{м}^3$. Полученная зависимость позволяет определять плотность цементного камня и толщину стенки колонны стандартных образцов при плотности породы $2410 \text{ кг}/\text{м}^3$ с точностью $\pm 50 \text{ кг}/\text{м}^3$ и 0,1 мм соответственно.

3.3.1. Расчет поправки вызванной влиянием плотности породы

По зависимостям для расчета толщины стенки обсадной колонны и плотности цементного камня, при плотности породы $2410 \text{ кг}/\text{м}^3$, были обработаны результаты измерений при других значениях плотности породы $1000, 1590, 1980 \text{ кг}/\text{м}^3$.

В таблице 18 приведена абсолютная погрешность определения плотности цемента и толщины стенки колонны.

Таблица 18. Погрешность определения плотности цементного камня и толщины стенки колонны.

Нк, мм.	$\rho_{ii},$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$1000 \text{ кг}/\text{м}^3$		$1590 \text{ кг}/\text{м}^3$		$1980 \text{ кг}/\text{м}^3$		$2410 \text{ кг}/\text{м}^3$	
		ИНТ, $\text{кг}/\text{м}^3$	ТЛЩ, мм.	ИНТ, $\text{кг}/\text{м}^3$	ТЛЩ, мм.	ИНТ, $\text{кг}/\text{м}^3$	ТЛЩ, мм.	ИНТ, $\text{кг}/\text{м}^3$	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 $2410 \text{ кг}/\text{м}^3$ абсолютная погрешность определения плотности цементного камня не превышает $50 \text{ кг}/\text{м}^3$, а толщины стенки колонны $0,1 \text{ мм}$. При определении параметров колонн, при плотностях породы отличной от плотности $2410 \text{ кг}/\text{м}^3$, 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 $<50 \text{ кг}/\text{м}^3$, была построена зависимость для определения поправки, позволяющей учесть влияние плотности породы на результаты измерений аппаратурой СГДТ. На рисунке 3.11. и 3.12. представлены зависимости для расчета поправок, вызванных влиянием плотности породы на результаты определения плотности цементного камня и толщины стенки колонны соответственно.

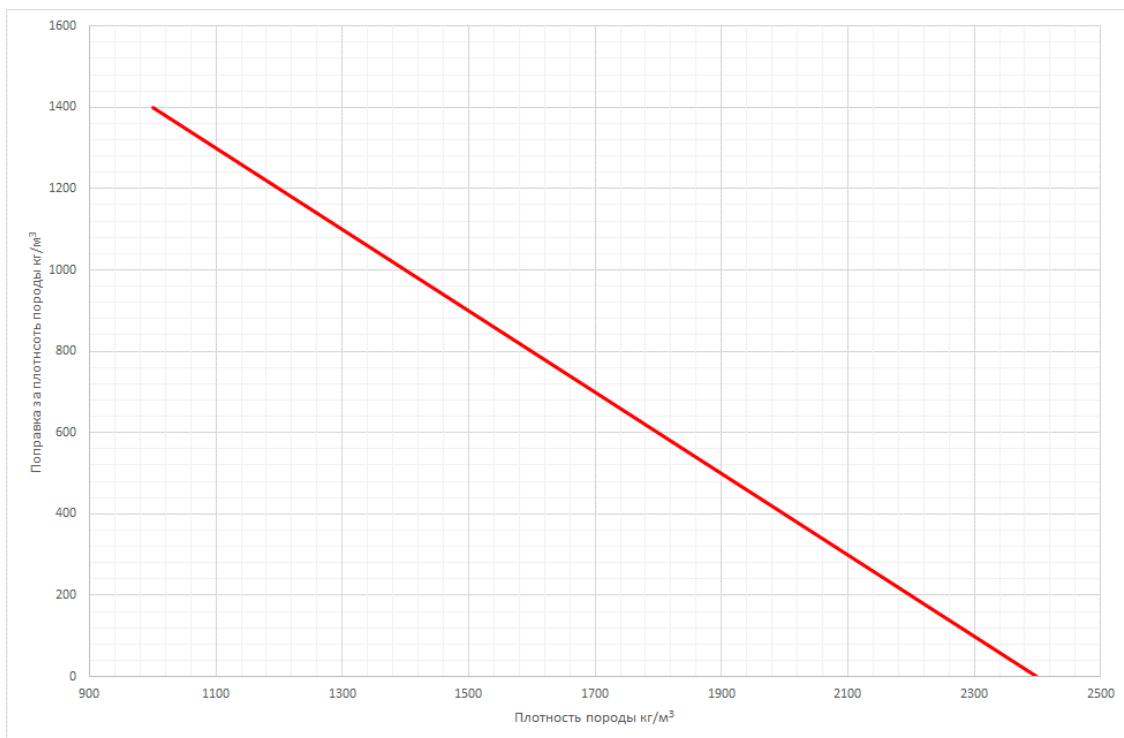


Рис. 3.11. Зависимость для расчета поправки, вызванной влиянием плотности породы на результаты определения плотности цементного камня аппаратурой СГДТ.

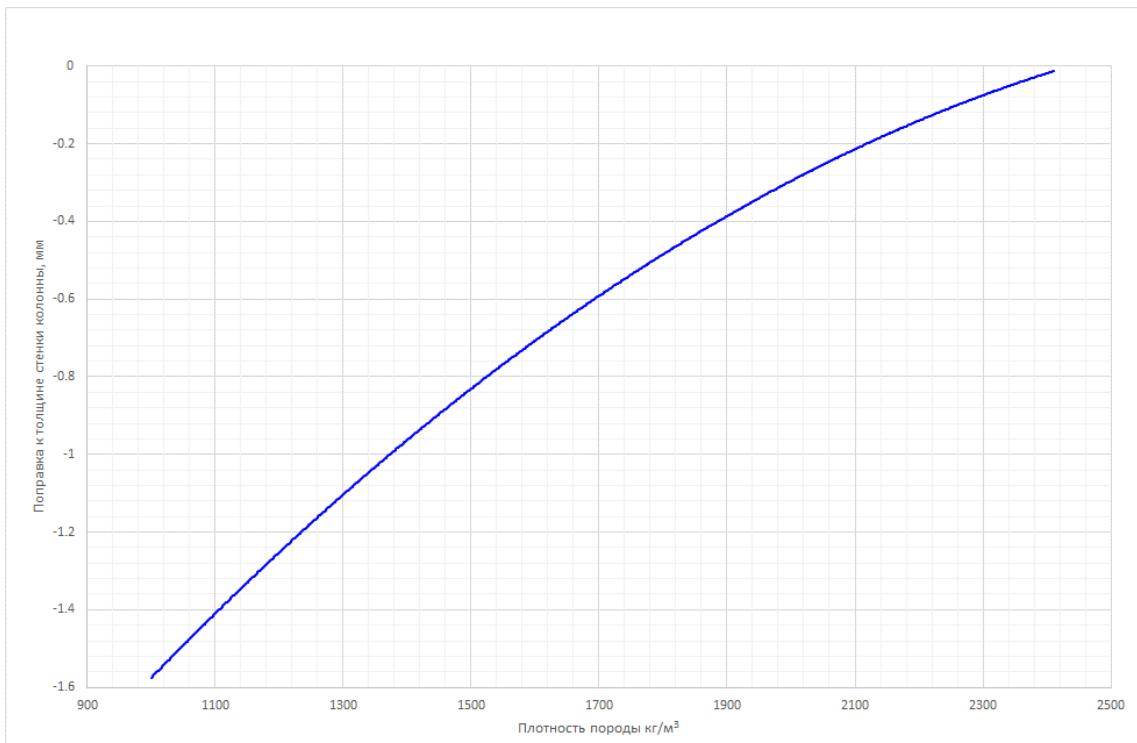


Рис. 3.12. Зависимость для расчета поправки вызванной влиянием плотности породы на результаты определения толщины стенки обсадной колонны аппаратурой СГДТ.

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

$$\begin{cases} R_{\text{ц}} = A_1 + B_1 * \ln \left(\frac{J_{\text{БЗ}}}{J_{\text{БЗ}}^{\text{ЭТ}}} \right) + C_1 * \ln \left(\frac{J_{\text{МЗ}}}{J_{\text{МЗ}}^{\text{ЭТ}}} \right) + F_1(R_{\text{п}}) \\ H_{\text{к}} = A_2 + B_2 * \ln \left(\frac{J_{\text{БЗ}}}{J_{\text{БЗ}}^{\text{ЭТ}}} \right) + C_2 * \ln \left(\frac{J_{\text{МЗ}}}{J_{\text{МЗ}}^{\text{ЭТ}}} \right) + F_2(R_{\text{п}}) \end{cases} \quad (17)$$

где

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

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

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

$F_1(R_n)$, $F_2(R_n)$ – функции учитывающие влияние плотности породы при определении R_u и H_k соответственно.

В таблице 19 приведены абсолютные погрешности определения плотности цементного камня и толщины стенки колонны, полученные с учетом влияния плотности породы.

Таблица 19. Погрешности определения плотности цементного камня и толщины стенки колонны, полученные с учетом влияния плотности породы.

H_k , мм.	ρ_n , 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.						
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, наблюдаются в образцах с эксцентричным расположением обсадной колонны.

3.4. Исследование эксцентричности колонны относительно оси скважины по результатам измерений аппаратурой типа СГДТ

Одни из первых исследований, в области оценки эксцентричности колонны относительно оси скважины аппаратурой по контролю технического состояния обсаженных скважин, описаны в работах [25, 45].

За характеристику эксцентризитета (ε), автором [45], принято отношение

$$\varepsilon = \frac{h_{max} - h_{min}}{h_{max}} \quad (18)$$

где h_{max} и h_{min} – максимальное и минимальное расстояние между колонной и скважиной. При таком определении эксцентризитет численно изменяется от нуля до единицы при перемещении колонны от центра к стенке скважины и не зависит от соотношения диаметров скважины и колонны.

В этих работах описанные исследования влияния эксцентризитета проводились в моделях, представляющих собой мраморный блок, объемной плотностью 2700 кг/м³ пробуренной в нем скважиной Ø300 мм обсаженной колонной диаметром Ø150 мм. Плотность сред, заполняющих кольцевое пространство – 1000, 1250, 2000 кг/м³. Измерения проводились вращающимся детектором (NaJ(Tl)) по периметру с шагом 10°. В результате измерений, при максимальном эксцентризите, форма кривой близка к синусоиде, причем амплитуда синусоиды тем больше, чем меньше плотность вещества в кольцевом пространстве. При минимальном эксцентризите форма кривой стремится к прямой линии.

Описанные результаты позволяют определить эксцентризитет лишь на качественном уровне. Конструкция моделей, в которых проводились исследования, не в полной мере соответствуют реальной конструкции обсаженных нефтяных и газовых скважин. Современные эксплуатационные скважины бурятся долотом диаметром 216 мм и обсаживаются стальными колоннами диаметром 146 – 177 мм. В такой конструкции скважины слой цементного кольца, при диаметре колонны 146 мм и условии, что колонна центрирована, составляет 35 мм, что более чем в два раза меньше чем в моделях, описанных в [45]. Соответственно, при слое цемента 35 мм на чувствительность аппаратуры к эксцентризитету будет в значительной мере больше влиять плотность породы, чем при слое цемента 75 мм.

Как правило, интерпретационная модель для оценки эксцентризитета колонны строится следующим образом: в процессе обработки скважинных диаграмм аппаратуры по контролю технического состояния скважин гамма-гамма методом, программный комплекс оценивает максимальную и минимальную амплитуду

показаний, измеренных по азимуту скважины несколькими детекторами. Минимальная амплитуда принимается за минимальный эксцентризитет т.е. колонна центрирована относительно оси скважины, максимальная амплитуда соответствует максимальному эксцентризитету колонны относительно оси скважины.

Влияние плотности породы не учитывается в должной мере ни в первом, ни во втором случаях. Как описывалось в главе II возможность оценивать эксцентризитет тем выше, чем выше разница между плотностью породы и плотностью цементного камня (рисунок 3.10.).

Образцы эксплуатационных колонн с эксцентричным расположением цементного кольца, входящие в состав калибровочной установки для аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных нефтяных газовых скважин, позволяют построить зависимость для оценки эксцентризитета колонны относительно оси скважины с учетом влияния плотности породы на показания аппаратуры.

На примере аппаратуры СГДТ-НВ, по результатам измерений в колоннах диаметром $\varnothing 146$ мм и эксцентричным расположением цементного камня (колонны №№ 2-4 таблица 14), входящих в состав калибровочной установки, автором были получены зависимости для расчета эксцентризитета колонны относительно оси скважины.

Максимальное и минимальное расстояние между колонной и скважиной в колоннах с эксцентричным расположением цементного камня составляет 60 и 10 мм соответственно. В цементном кольце отсутствуют какие-либо дефекты, полости и т.д. Величина эксцентризитета, рассчитанная по формуле (16), составляет $\varepsilon=0,83$.

В колоннах №№ 2 - 4 были проведены измерения с аппаратурой СГДТ-НВ во всем диапазоне воспроизводимых установкой плотностей породы. При измерениях детектор с шифром БЗ-1 устанавливался напротив тонкого слоя цемента, в таком случае детектор БЗ-4 находился напротив толстого слоя цемента. Первичные данные были обработаны по системе уравнений (15), в таблице 20 приведены результаты расчета кажущейся плотности цементного камня по каждому из

детекторов большого зонда. По результатам определения плотности цементного камня видно, что в зависимости от контраста плотности породы и плотности цементного камня напротив детекторов БЗ-1 и БЗ-4 получаются максимальные или минимальные значения кажущейся плотности.

Как уже отмечалось ранее, амплитуда показаний между детекторами, находящимися напротив тонкого и толстого слоя цементного кольца, есть некая качественная характеристика эксцентричности колонны относительно оси скважины, полученная по данным гамма-гамма каротажа.

Таблица 20. Результаты определения плотности цементного камня в колоннах с эксцентричным расположением цементного камня.

ρ_p , кг/м ³	№ кол. (табл. 14)	$\rho_{ц\ атт.}$, кг/м ³	БЗ-1, кг/м ³	БЗ-2, кг/м ³	БЗ-3, кг/м ³	БЗ-4, кг/м ³	БЗ-5, кг/м ³	БЗ-6, кг/м ³
1000	2	1947	1632	1824	2242	2483	2218	1801
	3	1000	1290	1265	1203	1176	1200	1252
	4	1535	1525	1622	1819	1918	1797	1600
1590	2	1947	1627	1744	1978	2102	1939	1709
	3	1000	1462	1249	975	891	1058	1346
	4	1535	1539	1547	1541	1559	1540	1535
1980	2	1947	1982	1971	1990	1993	1950	1953
	3	1000	1736	1477	1003	776	958	1423
	4	1535	1874	1760	1535	1431	1496	1718
2410	2	1947	2135	1998	1827	1787	1869	2066
	3	1000	1827	1252	663	532	907	1587
	4	1535	1993	1651	1282	1196	1428	1860

Очевидно, что построить зависимость для оценки эксцентричности необходимо в виде функции преобразования разности показаний детектора, находящегося напротив тонкого и толстого слоя цемента ($\rho_{ц1}-\rho_{ц2}$), от разности между плотностью породы и истинной плотности цементного камня ($\rho_p-\rho_{ц}$) (рисунок 3.13.).

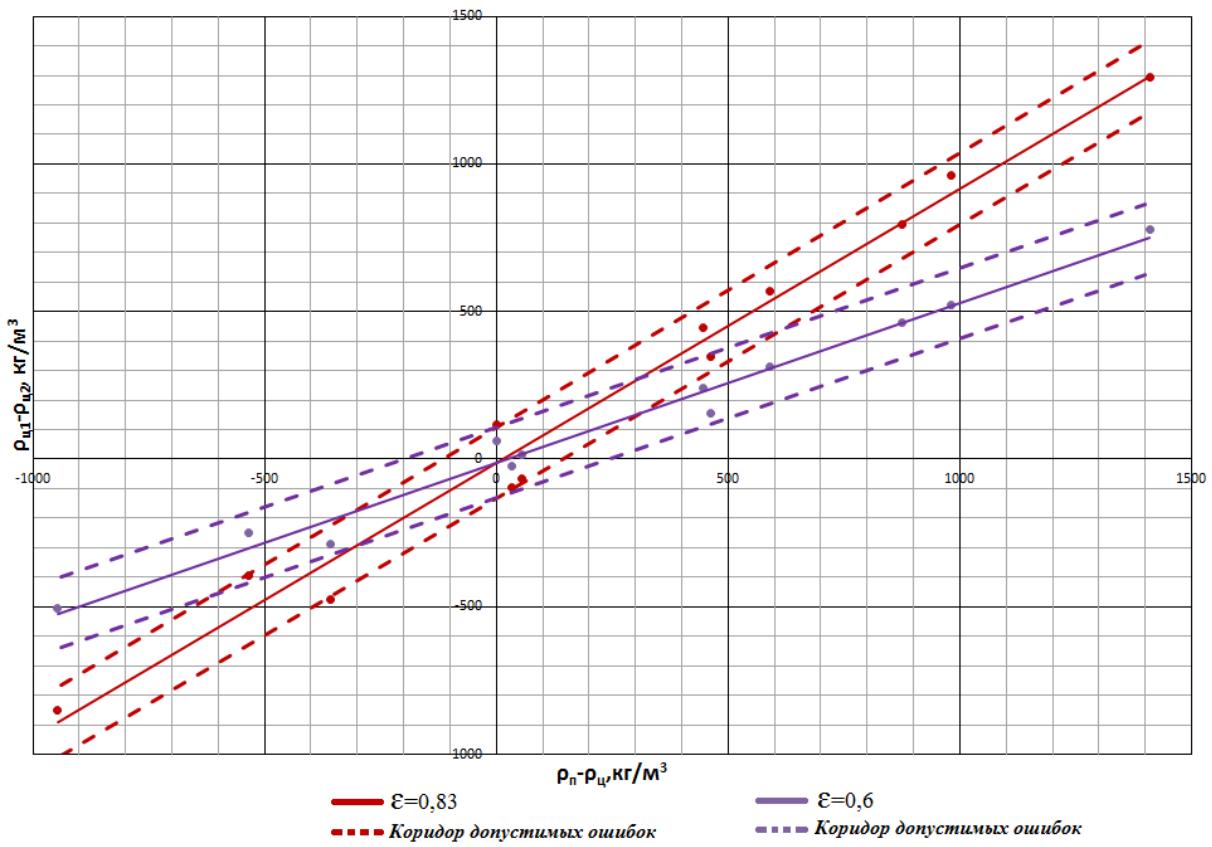


Рис. 3.13. Зависимость для определения эксцентризитета колонны Ø146 мм для аппаратуры СГДТ-НВ

На рисунке представлены зависимости для двух вариантов эксцентризитета $\epsilon=0,83$ – максимальный эксцентризитет, воспроизводимый колоннами, входящими в состав калибровочной установки, и промежуточный эксцентризитет $\epsilon=0,6$, имитация которого достигнута путем установки детектора на соответствующие для такого эксцентризитета толщины слоев цемента. В качестве коридора допустимых погрешностей принята максимальная допустимая абсолютная погрешность определения плотности цементного камня для аппаратуры СГДТ-НВ – 150 kg/m^3 .

Практическое использование полученной зависимости сводится к следующему: при наличии дополнительных данных о плотности породы, а также плотности цемента, можно получить значение их разности. Разность значений плотности породы и плотности цемента, при условии полного заполнения кольцевого пространства между колонной и стенками скважины цементом, будет соответствовать максимально возможной амплитуде показаний детекторами большого зонда, которая свидетельствует о максимально возможном

эксцентризите. Например, плотность породы в каком-нибудь интервале, по результатам каротажа в открытом стволе составила $\rho_p = 2350 \text{ кг}/\text{м}^3$, плотность цементного раствора, залитого в скважину $\rho_{ц} = 2000 \text{ кг}/\text{м}^3$. Разность составляет $350 \text{ кг}/\text{м}^3$, соответственно. В случае максимального эксцентризита $\varepsilon=1$ колонны в этом интервале максимальная разница между детекторами большого зонда в единицах кажущейся плотности цемента не должна превышать $350 \text{ кг}/\text{м}^3$ соответственно, Минимальный эксцентризитет $\varepsilon=0$ будет соответствовать минимальной разнице между детекторами большого зонда.

Получив зависимость разности кажущейся плотности цемента на тонком и толстом слоях цементного камня от величины эксцентризита, как отмечалось в работе [46] она имеет линейный вид, и рассчитав величину эксцентризита, можно рассчитать толщину слоя для каждого детектора большого зонда по формуле [47]:

$$h_{ц} = (\Delta R \sin \varphi + \sqrt{R^2 - \Delta R \cos^2 \varphi}) - r \quad (19)$$

где

$h_{ц}$ – толщина слоя цемента напротив детектора;

ΔR – смещение центра колонны относительно центра скважины;

R – радиус скважины;

r – радиус колонны;

φ – угол под которым расположен конкретный детектор.

Коридор допустимых ошибок для функций эксцентризита (рисунок 3.13.) позволяет оценить реальные возможности по оценке эксцентризита аппаратурой СГДТ-НВ. Из рисунка следует, что при разности плотности породы и плотности цемента меньше $200 \text{ кг}/\text{м}^3$, выявление эксцентризита, на фоне допустимых погрешностей, практически невозможно. В случае если эксцентризитет $\varepsilon \geq 0,8$ его надежное определение возможно лишь при $(\rho_p - \rho_{ц}) > 250 \text{ кг}/\text{м}^3$, при уменьшении эксцентризита возможность его определения значительно падает, например, при эксцентризите $\varepsilon=0,6$ его определение возможно лишь при $(\rho_p - \rho_{ц}) > 300-400 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Учитывая тот факт, что в реальных разрезах нефтяных и газовых скважин величина ($\rho_{\text{п}}-\rho_{\text{ц}}$), при плотности цемента $\rho_{\text{ц}}=1900-2000 \text{ кг}/\text{м}^3$, в большинстве случаев не превышает $400 \text{ кг}/\text{м}^3$, определение эксцентриситета аппаратурой по контролю технического состояния обсаженных скважин возможно лишь при эксцентриситете $\varepsilon \geq 0,6$.

3.5. Разработка вторичных эталонов геофизических параметров для аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных нефтяных и газовых скважин

Как и вся геофизическая скважинная аппаратура, аппаратура по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом подлежит обязательной ежеквартальной калибровке. В этом случае достаточно провести измерения в трех образцах, позволяющих оценить стандартность работы обоих зондов аппаратуры.

С этой целью в производственных филиалах ООО «Газпром георесурс» внедрены калибровочные установки КУ-СГДТ, КУ-ЦМ, разработанные при непосредственном участии автора, позволяющие проводить калибровку аппаратуры.

Калибровочные установки включают в себя три образца, воспроизводящих два значения плотности цементного камня и два значения толщины обсадной колонны. Для каждого диаметра обсадной колонны необходимо изготавливать комплект из трех образцов.

Конструктивно каждый образец представляет собой цилиндрическую емкость, по центру которой установлена стальная обсадная колонна с цементным кольцом, а пространство между цементным кольцом и стенками емкости заполнено материалом, воспроизводящим свойства породы (рисунок 3.14.).

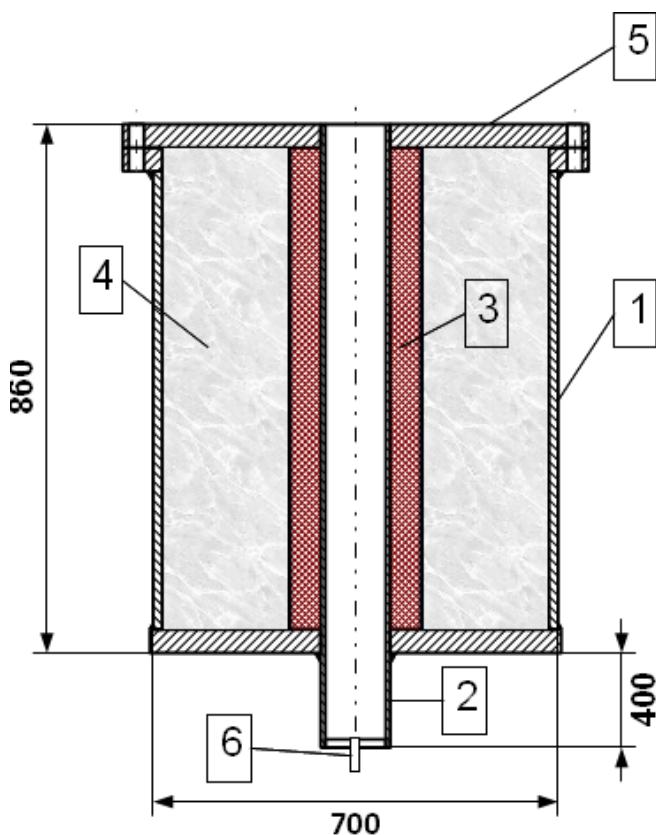


Рис. 3.14. Схематическая конструкция стандартного образца.
1-Корпус образца; 2-Стальная колонна; 3-Цементное кольцо; 4-Порода;
5-Крышка; 6-Вентиль

Нижний конец колонныпущен на 400 мм ниже дна емкости и выполняет функцию зумпфа. Обсадная труба заглушена снизу и снабжена вентилем для слива воды. Сверху образец закрыт крышкой.

Аттестованными метрологическими характеристиками каждого образца являются значения плотности цементного камня, толщины обсадной колонны и плотности вмещающей породы (справочная характеристика). В таблице 21 приведен диапазон значений этих параметров.

Таблица 21. Параметры вторичных эталонов геофизических параметров.

№ образца	$\rho_{\text{п.}}$, кг/м ³	Нст.	$\rho_{\text{п.}}$, кг/м ³
1	1900-2100	8-9 мм.	2450
2	1100-1300	8-9 мм.	2450
3	1900-2100	5-6 мм.	2450

3.6. Устройство для тестирования аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом

Повышение эффективности при контроле технического состояния обсаженных скважин гамма – гамма методом за счет совершенствования метрологического обеспечения аппаратуры и интерпретационных зависимостей описано в предыдущей главе. Описанное оборудование позволяет проводить контроль метрологических параметров аппаратуры в стационарных метрологических центрах.

Отдаленность многих современных месторождений нефти и газа, расположенных в трудно доступных местах, доставка аппаратуры с которых доставляет некоторые неудобства. С целью контроля метрологических параметров разработано и запатентовано устройство для тестирования аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма – гамма методом - СГДТ-ТЕСТ.

Устройство для тестирования аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин СГДТ-ТЕСТ предназначено для тестирования аппаратуры типа СГДТ без использования источника ионизирующего излучения в полевых условиях и непосредственно перед спуском в скважину.

Конструктивно устройство тестирования СГДТ-ТЕСТ представляет собой корпус из двух полых скрепленных между собой коаксиальных цилиндров. Полость корпуса, образованная цилиндрическими стенками [65], равномерно заполнена гамма излучающим веществом, при этом внутренний диаметр центрального цилиндра корпуса должен быть больше или равен внешнему диаметру тестируемого прибора, а высота корпуса h устройства должна удовлетворять выражению $h \geq d_k$, где d_k – вертикальный размер коллимационного окна детектора тестируемых приборов (рисунок 3.15.)

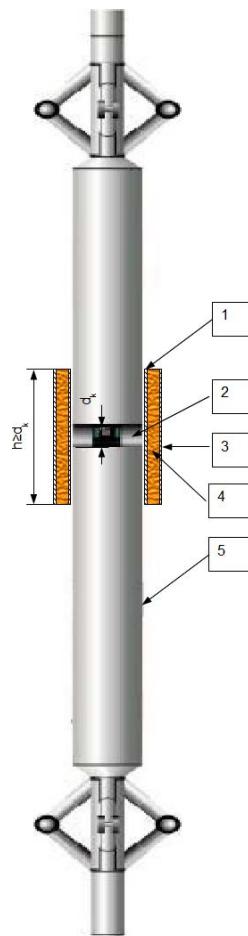


Рис. 3.15. Схематическая конструкция СГДТ-ТЕСТ вместе с исследуемым прибором[65].

1-Внешний цилиндр устройства; 2-коллимационные окна детекторов; 3-внешний цилиндр устройства; 4-гамма активное вещество; 5-тестируемый прибор

Эксплуатация устройства осуществляется следующим образом:

После проведения калибровки аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом в стандартных образцах или калибровочной установке, необходимо разместить устройство СГДТ-ТЕСТ на корпусе прибора, поочередно, напротив коллимационных окон детекторов малого и большого зондов, таким образом, чтобы середина коллимационного окна совпадала с серединой устройства.

Не устанавливая источник гамма-квантов в прибор, зарегистрировать показания, регистрируемые детекторами.

Считать показания с детектора малого зонда и всех детекторов большого зонда. Результаты занести в паспорт прибора.

При проведении последующих измерений в СГДТ-ТЕСТ этим прибором необходимо сопоставить результат измерений с первичным измерением, в случае совпадения данных с точностью $\pm 5\%$, прибор признается годным для последующей эксплуатации. При невыполнении этого условия прибор подлежит ремонту с последующей переградуировкой.

3.7. Повышение эффективности геофизических исследований при контроле технического состояния обсаженных нефтяных и газовых скважин гамма-гамма методом

Эффективность геофизических исследований при контроле технического состояния обсаженных скважин гамма – гамма методом заключается в технологичности проведения скважинных измерений, интерпретации скважинного материала, а также в совершенствовании метрологического обеспечения и др.

Как было сказано выше, 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. Так как плотностной гамма-гамма каротаж проводится в основном в разведочных скважинах. При бурении эксплуатационных скважин ГГК-П в комплекс ГИС не входит.

С целью повышения эффективности определения параметров, аппаратурой типа СГДТ, за счет учета влияния плотности породы за одну спускоподъемную операцию, автором было предложено дополнить стандартную двухзондовую установку аппаратуры СГДТ третьим, дополнительным, зондом, располагающимся за большим зондом [63].

Для решения этой задачи было проведено математическое моделирование аппаратуры по оценке технического состояния обсаженных скважин, содержащую трехзондовую гамма-гамма установку[63].

Моделирование работы трех зондовой установки было проведено на базе серийно выпускаемой аппаратуры типа СГДТ-НВ (рисунок 3.16.).

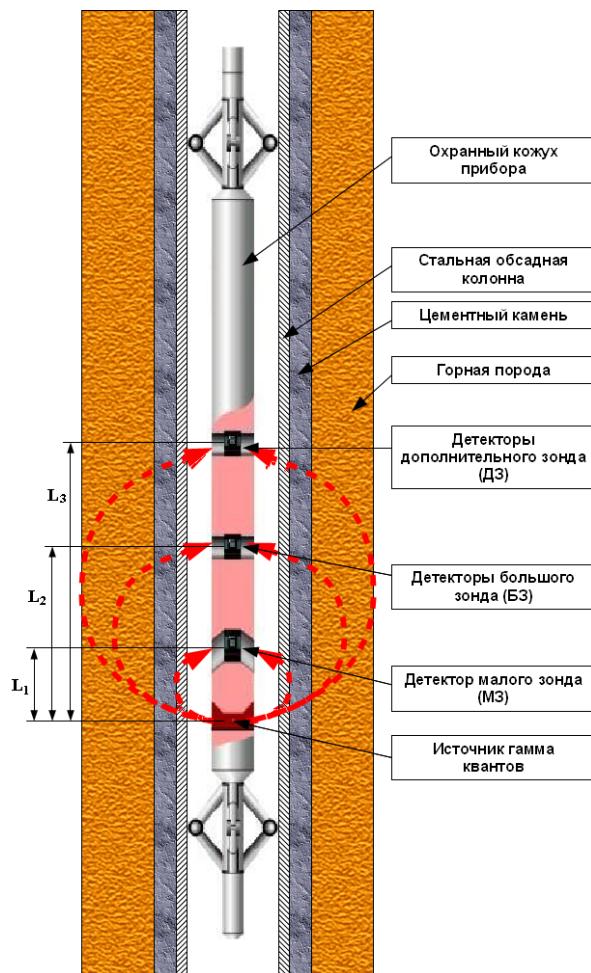


Рис.3.16. Схематический вид трехзондового прибора по оценке технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом[63].

Малый зонд устройства содержит один сцинтилляционный гамма детектор на основе NaI(Tl) размером $\varnothing 16 \times 40$ мм, расположенный в 210 мм от источника гамма-квантов по оси прибора и коллимированный в осевом направлении, а большой зонд скважинного устройства содержит шесть таких детекторов, расположенных равномерно в поперечном сечении прибора, детекторы взаимно экранированы и коллимированы в осевом направлении. Детекторы большого зонда расположены на расстоянии 420 мм от источника гамма-квантов. Конструкция дополнительного, третьего зонда представляет собой точную копию стандартного большого зонда.

Целью моделирования было определение оптимального расстояния 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 $1000 - 2410 \text{ кг}/\text{м}^3$. При этом длина дополнительно зонда должна обеспечивать достаточную статистическую точность.

В таблице 22 приведены результаты расчетов интенсивности рассеянного гамма – излучения, полученные автором на различных длинах зондов при различных плотностях породы. Количество импульсов, зарегистрированных детектором NaJ, нормированного на 1 см^3 объёма детектора и один гамма квант с энергией 662 кэВ источника.

Таблица 22. Результаты расчетов интенсивности рассеянного гамма – излучения для зондов разной длины.

$\rho_{п}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	$\rho_{ц}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	Н $к$, мм.	M3	B3	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 3.17.). При построении диаграмм, данные от нормированы на показания в первой строке.

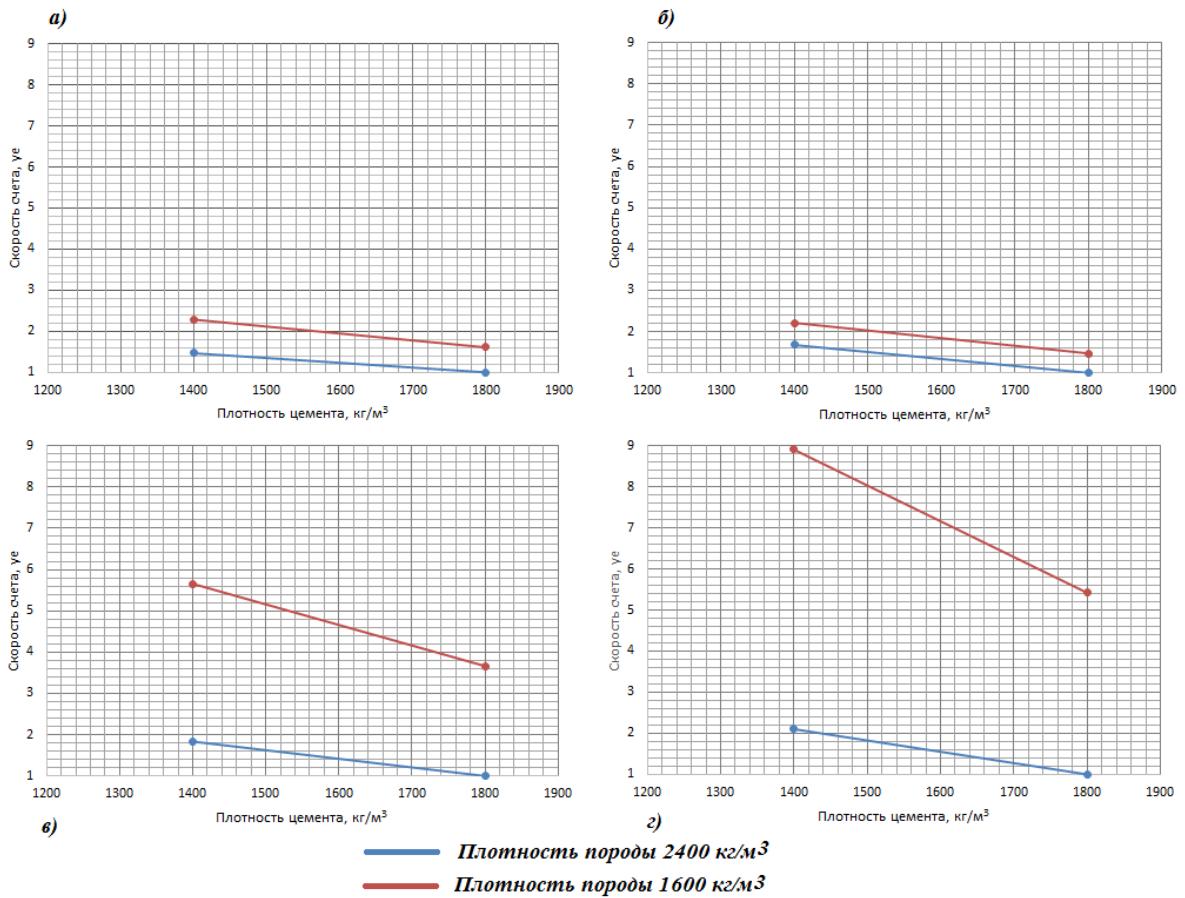


Рис.3.17. Влияние плотности цемента и плотности породы на зонды разной длины
а) Зонд 420 мм (стандартный БЗ); **б)** зонд 540 мм; **в)** зонд 620 мм;
г) зонд 700 мм.

На рисунке 3.17а 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.

Кроме того, 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 двухзондовой аппаратуры является введение дополнительных данных, полученных с дополнительного зонда, которые позволяют учесть влияние плотности породы на показания большого зонда:

$$\begin{cases} \rho_u = A_1 + B_1 * \ln\left(\frac{J_{БЗ}}{J_{БЗ}^{\text{эт}}}\right) + C_1 * \ln\left(\frac{J_{МЗ}}{J_{МЗ}^{\text{эт}}}\right) + D_1 * \ln\left(\frac{J_{ДЗ}}{J_{ДЗ}^{\text{эт}}}\right) \\ H_k = A_2 + B_2 * \ln\left(\frac{J_{БЗ}}{J_{БЗ}^{\text{эт}}}\right) + C_2 * \ln\left(\frac{J_{МЗ}}{J_{МЗ}^{\text{эт}}}\right) + D_2 * \ln\left(\frac{J_{ДЗ}}{J_{ДЗ}^{\text{эт}}}\right) \\ \rho_n = A_3 + B_3 * \ln\left(\frac{J_{БЗ}}{J_{БЗ}^{\text{эт}}}\right) + C_3 * \ln\left(\frac{J_{МЗ}}{J_{МЗ}^{\text{эт}}}\right) + D_3 * \ln\left(\frac{J_{ДЗ}}{J_{ДЗ}^{\text{эт}}}\right) \end{cases} \quad (20)$$

где

ρ_u, H_k, ρ_n – плотность цементного камня, толщина стенки колонны и плотность породы соответственно;

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

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

Для каждой длины зонда была решена система уравнений (18) и получены соответствующие коэффициенты A, B, C, D .

В таблицах 23 и 24 приведены абсолютные погрешности расчетов плотности цементного камня и толщины стенки соответственно.

Таблица 23. Погрешность определения плотности цементного камня по расчетным данным при различной длине дополнительного зонда.

ρ_p	ρ_n	H_k	Длина дополнительного зонда, мм		
			540	620	700
			$\Delta \rho_{\text{ц}}, \text{кг}/\text{м}^3$		
2400	1800	8	-12	5	12
	1800	6	36	-11	10
	1400	8	-293	-67	-71
	1400	6	-246	-86	-128
1600	1800	8	186	80	85
	1800	6	234	68	69
	1400	8	-86	71	68
	1400	6	-37	59	66
1000	1800	8	179	-27	-30
	1800	6	179	-27	-30
	1400	8	-94	-26	-25
	1400	6	-46	-39	-25

Таблица 24. Погрешность определения толщины стенки обсадной колонны по расчетным данным при различной длине дополнительного зонда.

ρ_p	ρ_n	H_k	Длина дополнительного зонда, мм		
			540	620	700
			$\Delta H_k, \text{мм.}$		
2400	1800	8	0,09	0,03	0,02
	1800	6	-0,03	0,01	0,01
	1400	8	0,19	-0,14	-0,18
	1400	6	0,03	-0,21	-0,15
1600	1800	8	0,09	0,37	0,36
	1800	6	-0,09	0,29	0,32
	1400	8	0,03	-0,01	-0,05
	1400	6	-0,22	-0,14	-0,16
1000	1800	8	0,65	0,75	0,78
	1800	6	-1,35	-1,25	-1,22
	1400	8	0,45	0,24	0,21
	1400	6	0,17	0,07	0,06

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

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

На основании математического моделирования, по рекомендациям автора и его непосредственном участии, в Центре метрологии и сертификации ООО «Газпром георесурс» был сконструирован полномасштабный макет трехзондового скважинного прибора по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом.

Зондовая часть скважинного прибора (рисунок 3.18.) содержит охранный корпус 1, источник гамма квантов 2, малый 3 и большой 4 зонды рассеянного гамма-излучения, экран 5 с коллимирующими отверстиями 9, дополнительный зонд 10.

Охранный корпус 1 выполняется из стали толщиной около 8 мм и служит в качестве прочного корпуса устройства.

Источником гамма квантов 2 служит изотопный источник Cs-137 активностью около $1 \cdot 10^{10}$ Бк.

Малый зонд 3 включает в себя сцинтиляционный гамма детектор с кристаллом размером $\varnothing 16 \times 40$ мм, (например, на основе сцинтилятора NaI(Tl)), расположенный на оси охранного корпуса 1 внутри экрана 5 на расстоянии 212 мм от источника гамма квантов 2.

Большой зонд 4 включает в себя шесть гамма детекторов, подобных детектору малого зонда 3 и расположенных равномерно в поперечном сечении охранного корпуса 1 внутри экрана 5 на расстоянии $L_2=2 \cdot L_1$, измеряемого по оси охранного корпуса 1, от источника гамма квантов 2 по ту же сторону от источника гамма квантов 2, что и детектор малого зонда 3.

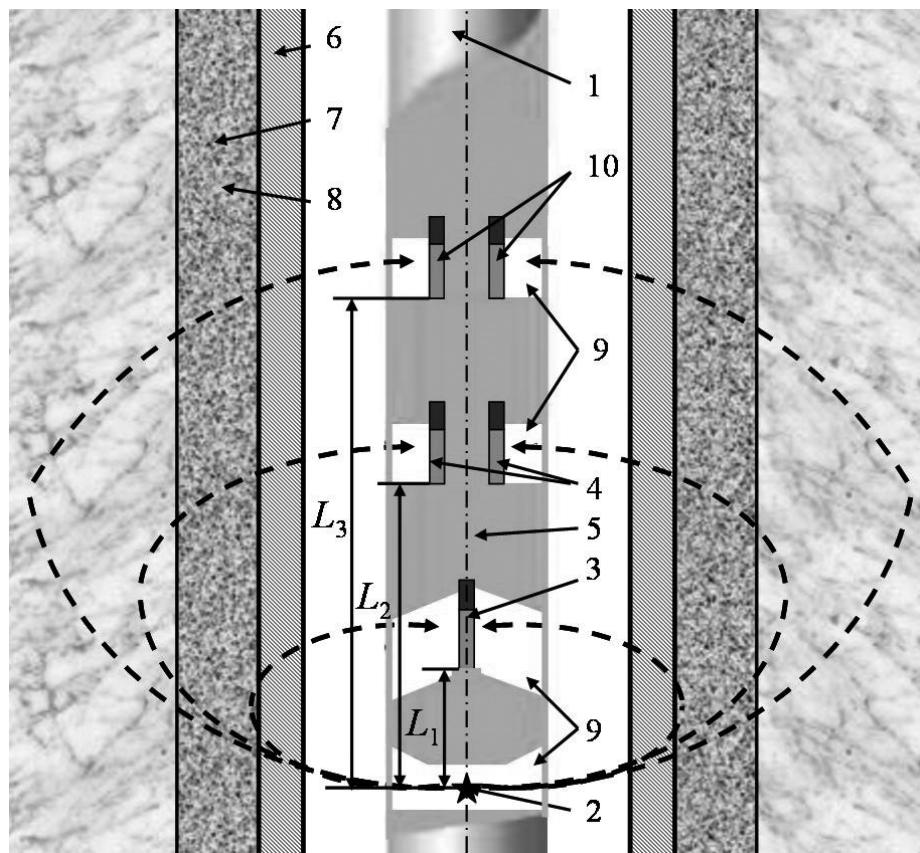


Рис.3.18. Зондовая часть трехзондового прибора для контроля технического состояния обсаженных скважин гамм – гамма методом

Дополнительный зонд 10 включает в себя шесть гамма детекторов, подобных детектору малого зонда 3 и расположенных равномерно в поперечном сечении охранного корпуса 1 внутри экрана 5 на расстоянии $L_3=600$, измеряемого по оси охранного корпуса 1, по ту же сторону от источника гамма квантов 2, что и детекторы большого зонда 4.

Экран 5 служит для формирования углового распределения излучаемых и регистрируемых гамма квантов. Для этого в экране 5 предусмотрены коллимирующие отверстия 9. Экран 5 изготавливается из металла с большим зарядом электронной оболочки атома, например, свинца или вольфрама, обладающих большим сечением ослабления потока гамма квантов. Ось экрана 5 совпадает с осью охранного корпуса 1.

Стенка стальной обсадной колонны 6 и цементный камень 7 обеспечивают прочность конструкции скважины, окруженной горной породой 8. Толщина стенки H_k обсадной колонны 6 составляет около 8 мм. Толщина цементного камня 7 вокруг

обсадной колонны 6 составляет примерно 35 мм.

Принцип работы прибора следующий: прибор помещают внутрь обсадной колонны и перемещают вдоль ее оси. Гамма излучение создается источником, проходит через соответствующее коллимирующее отверстие в экране, попадает в окружающую среду: стенку обсадной колонны, цементный камень и горную породу, где рассеивается и поглощается. Возникающие при этом рассеянные гамма кванты частично проходят через коллимирующие отверстия в экране, находящиеся напротив гамма детекторов малого, большого и дополнительного зондов, попадают на сцинтиляционные кристаллы гамма детекторов этих зондов, где частично регистрируются.

Интенсивность рассеянного гамма излучения J_{m3} , регистрируемая гамма детектором малого зонда, в основном определяется толщиной H_k стенки обсадной колонны.

Интенсивность рассеянного гамма излучения J_{b3} , регистрируемая гамма детекторами большого зонда, определяется толщиной H_k стенки обсадной колонны, плотностью ρ_c цементного камня 7 и плотностью ρ_p окружающей горной породы.

Интенсивность рассеянного гамма излучения J_{dz} , регистрируемая гамма детекторами дополнительного зонда, в значительно большей степени, чем для большого зонда, определяется плотностью ρ_p породы.

Обработка результатов измерений осуществляется с использованием системы уравнений (18).

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 погрешности данные с детекторов дополнительного зонда суммировались.

По результатам измерений в калибровочной установке была проведена оценка чувствительности дополнительного зонда макетного трехзондового прибора

(рисунок 3.19.). С целью сопоставления экспериментальных результатов с результатами математического моделирования на рисунок добавлены расчетные данные.

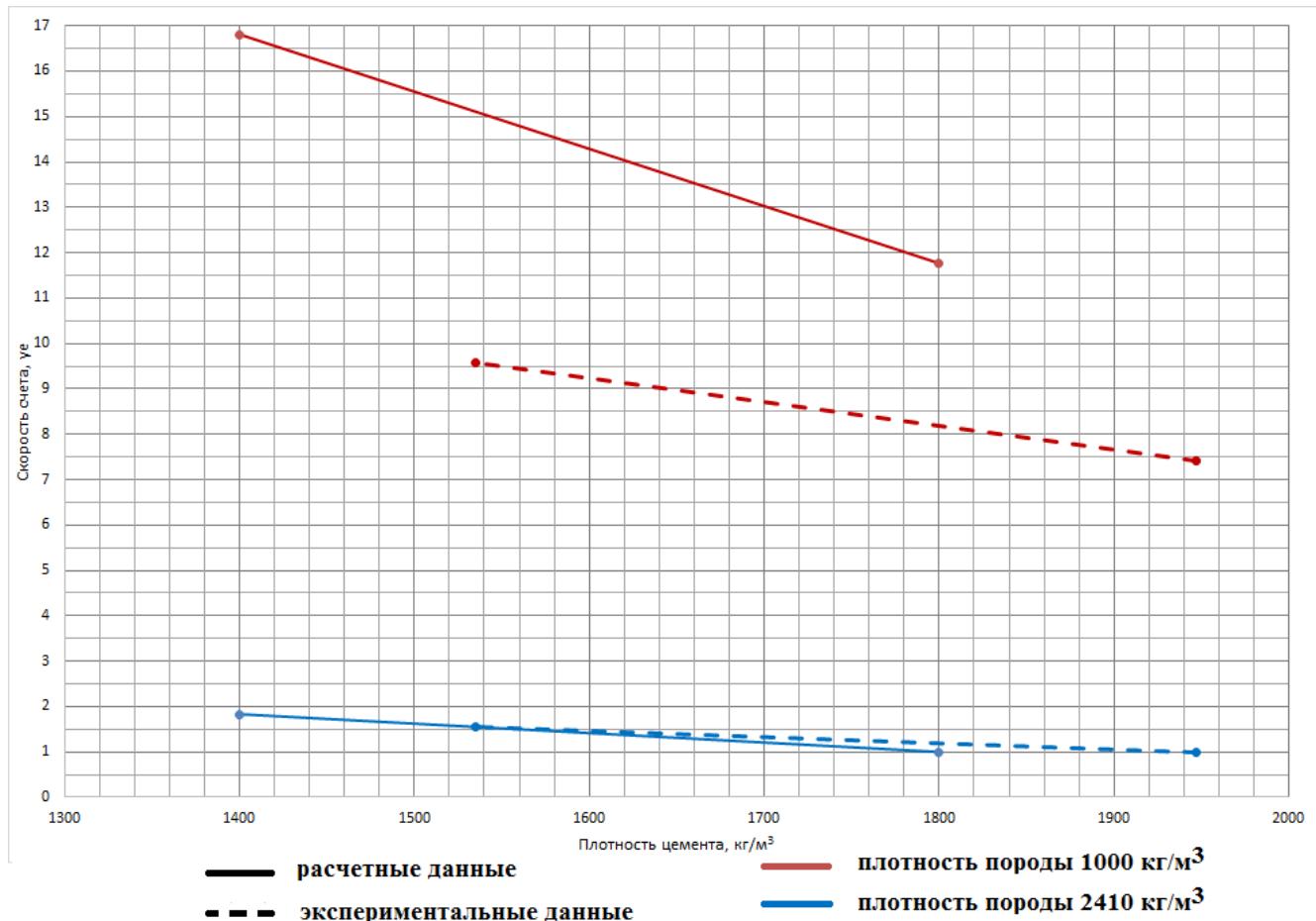


Рис.3.19. Сопоставление чувствительности дополнительного зонда, полученной по расчетным и экспериментальным данным

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 измерений в эталонных обсадных колоннах калибровочной установки для

аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом были определены коэффициенты для системы уравнений (18) и определены параметры обсадных колонн при различных плотностях породы.

На рисунке 3.20. представлены результаты измерения в стандартных образцах (красная кривая) трехзондовой аппаратурой.

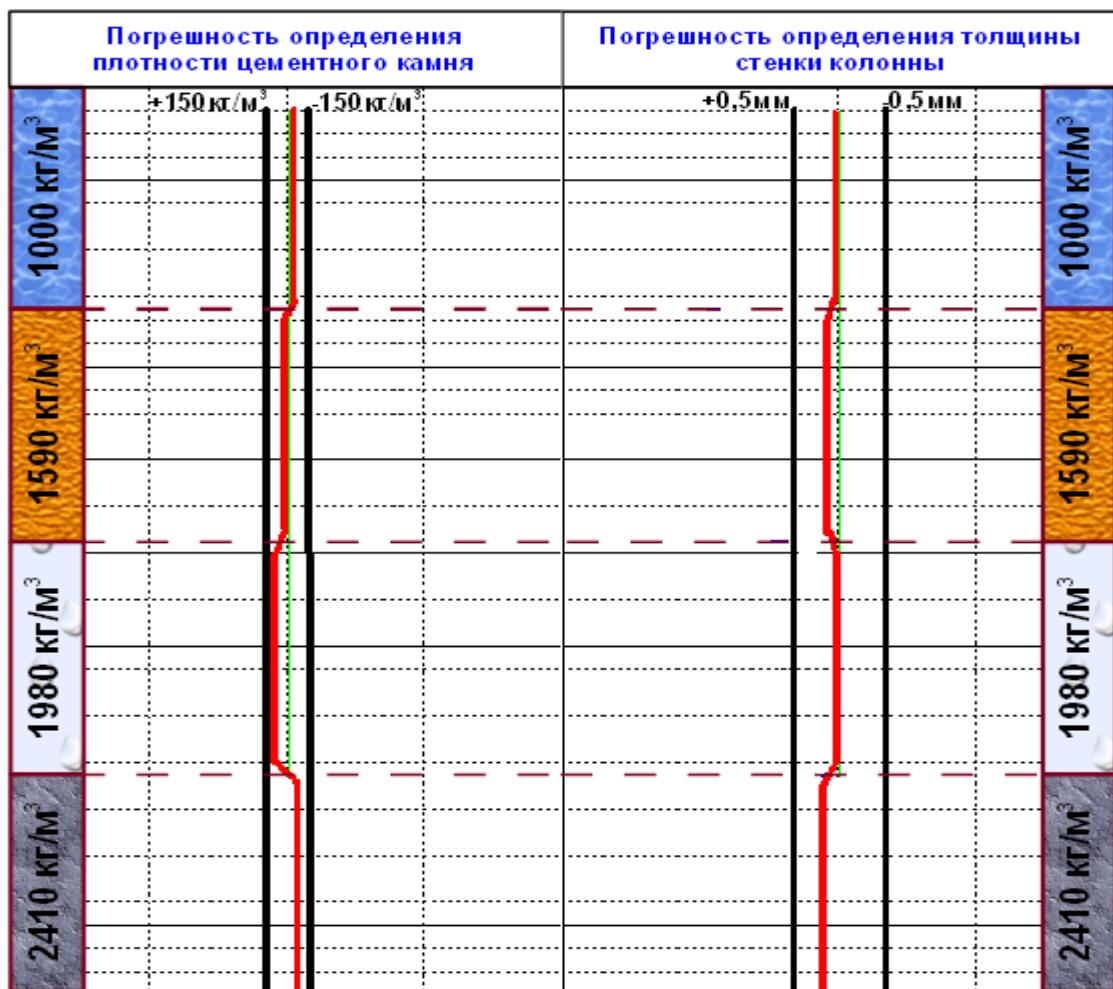


Рис.3.20. Погрешность определения плотности цементного камня и толщины стенки колонны трехзондовой аппаратурой оценки технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом. Черные прямые – коридор допустимых погрешностей.

Из рисунка видно, что определение параметров обсадных колонн при разных значениях плотности породы хорошо укладываются в коридор допустимых погрешностей.

По завершению модельных испытаний были проведены скважинные испытания макетного образца трехзондового прибора в одной из скважин подземного хранилища газа в центральном регионе России. Эта скважина

примечательна тем, что в ней не проводился плотностной гамма-гамма каротаж и соответственно отсутствуют какие-либо данные о плотности породы. На рисунках 3.21. (а, б, в, г, д, е, ж) приведены наиболее яркие фрагменты каротажной диаграммы, характеризующие плотность цементного камня по стволу скважины, по которым можно судить о преимуществах трехзондовой аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин. На всех рисунках на левом поле 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 $\pm 150 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Из рисунков 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 $600 \text{ кг}/\text{м}^3$, 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.

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 $\pm 150 \text{ кг}/\text{м}^3$. 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.

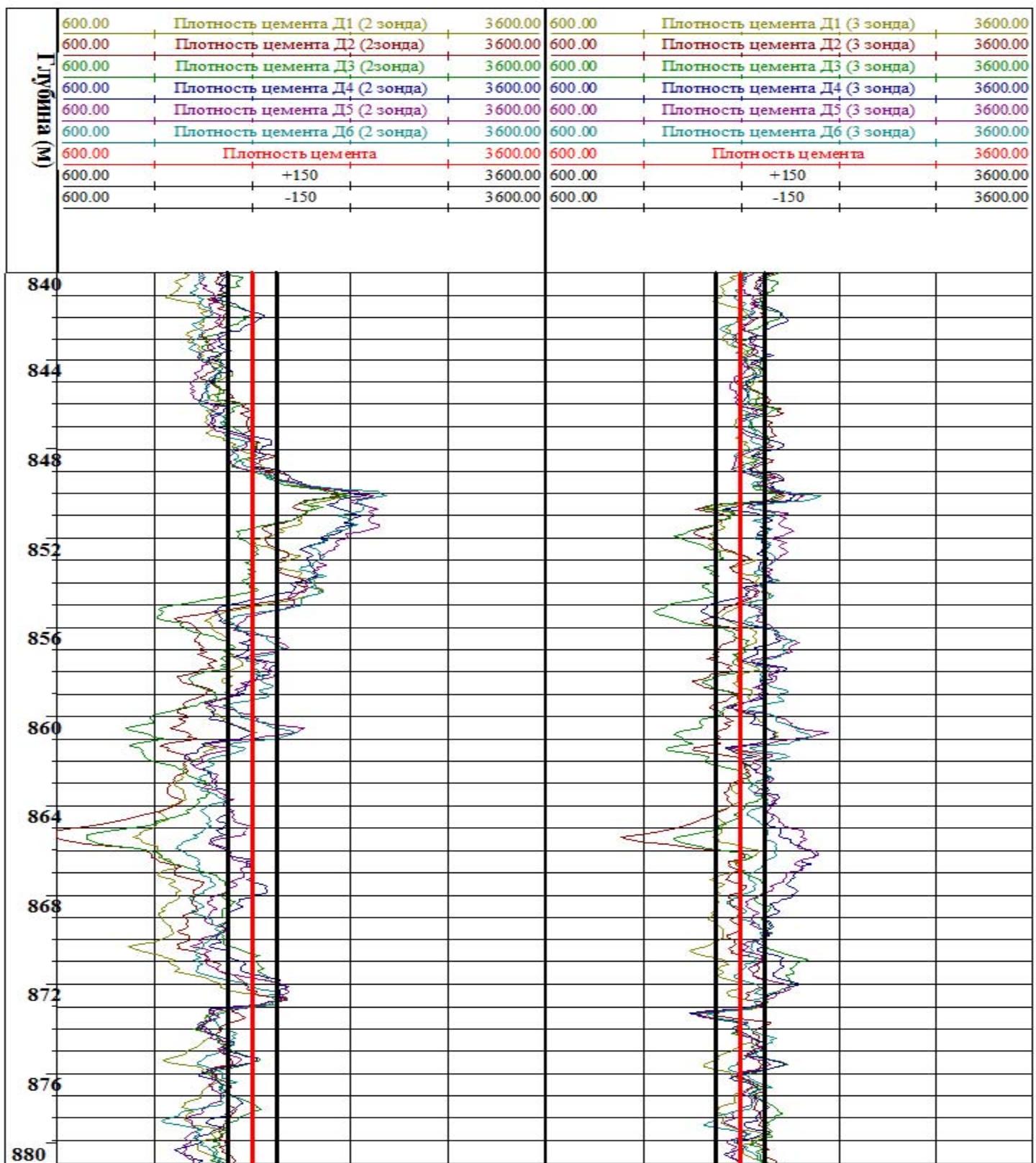


Рис. 3.21а. Сравнение результатов определения плотности цементного камня в газовой скважине, полученной двухзондовой и трехзондовой аппаратурой. Интервал глубин 840- 880 м.

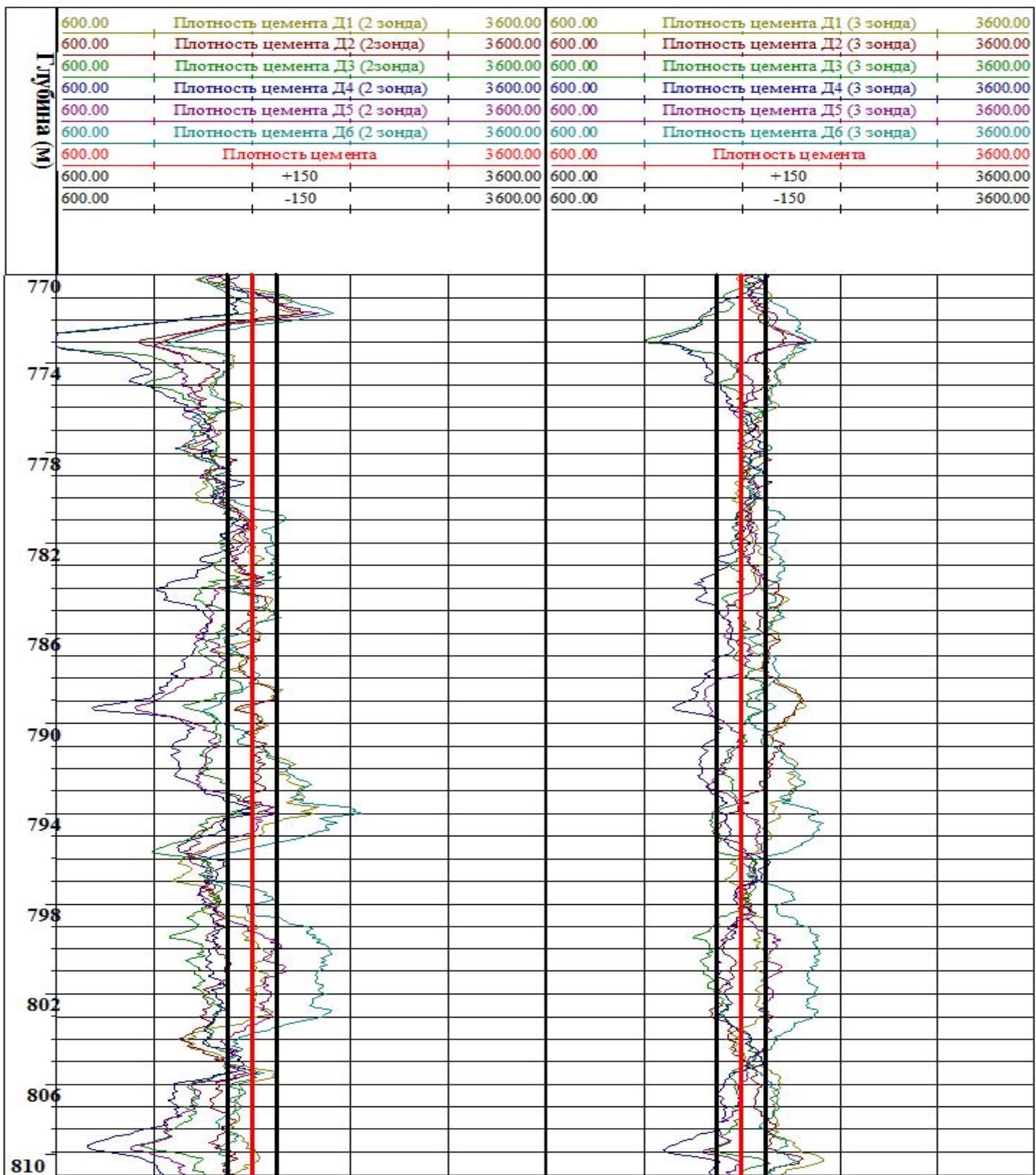


Рис. 3.216. Сравнение результатов определения плотности цементного камня в газовой скважине, полученной двухзондовой и трехзондовой аппаратурой. Интервал глубин 770- 810 м.

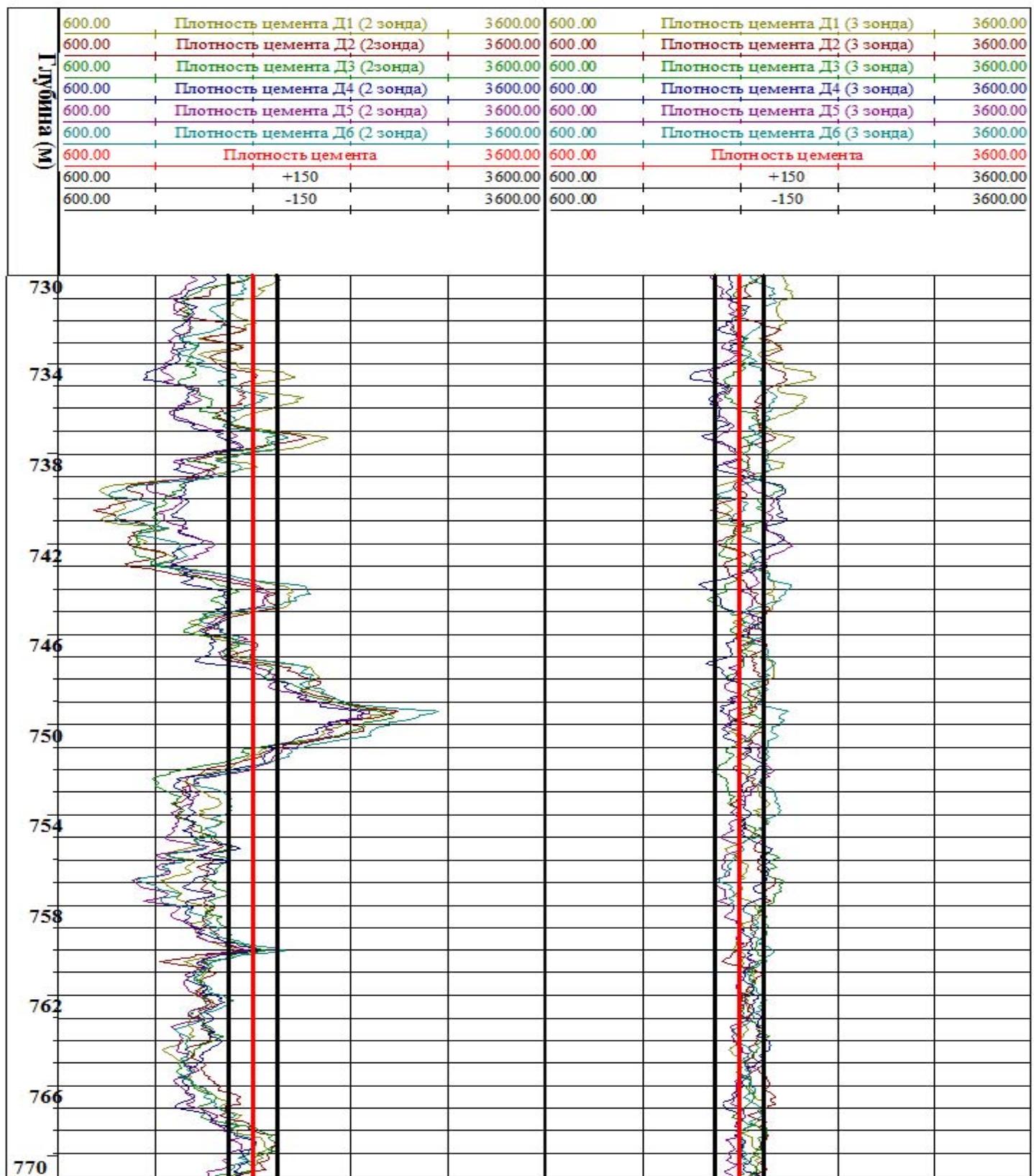


Рис. 3.21в. Сравнение результатов определения плотности цементного камня в газовой скважине, полученной двухзондовой и трехзондовой аппаратурой. Интервал глубин 730- 770 м.

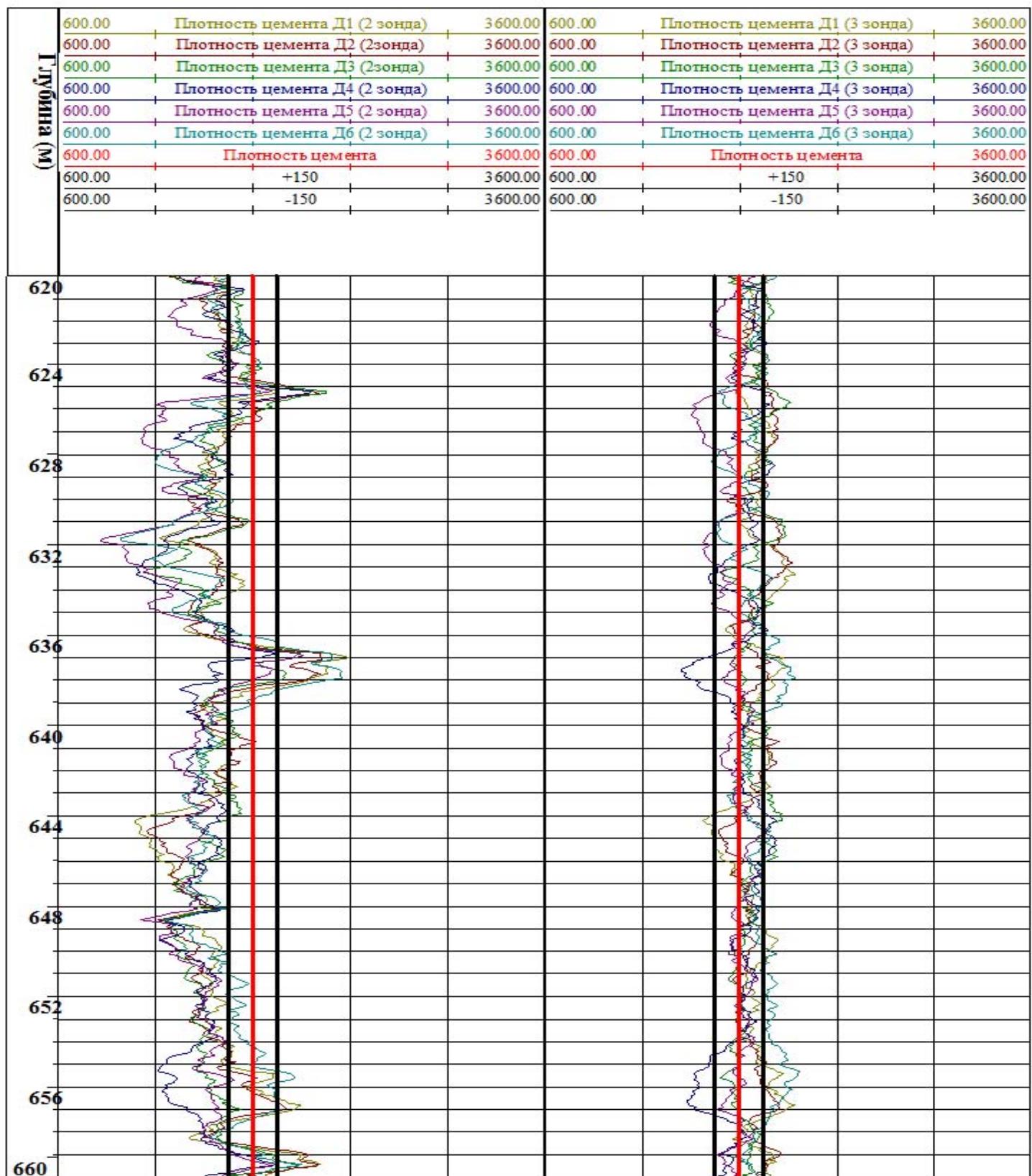


Рис. 3.21г. Сравнение результатов определения плотности цементного камня в газовой скважине, полученной двухзондовой и трехзондовой аппаратурой. Интервал глубин 620- 660 м.

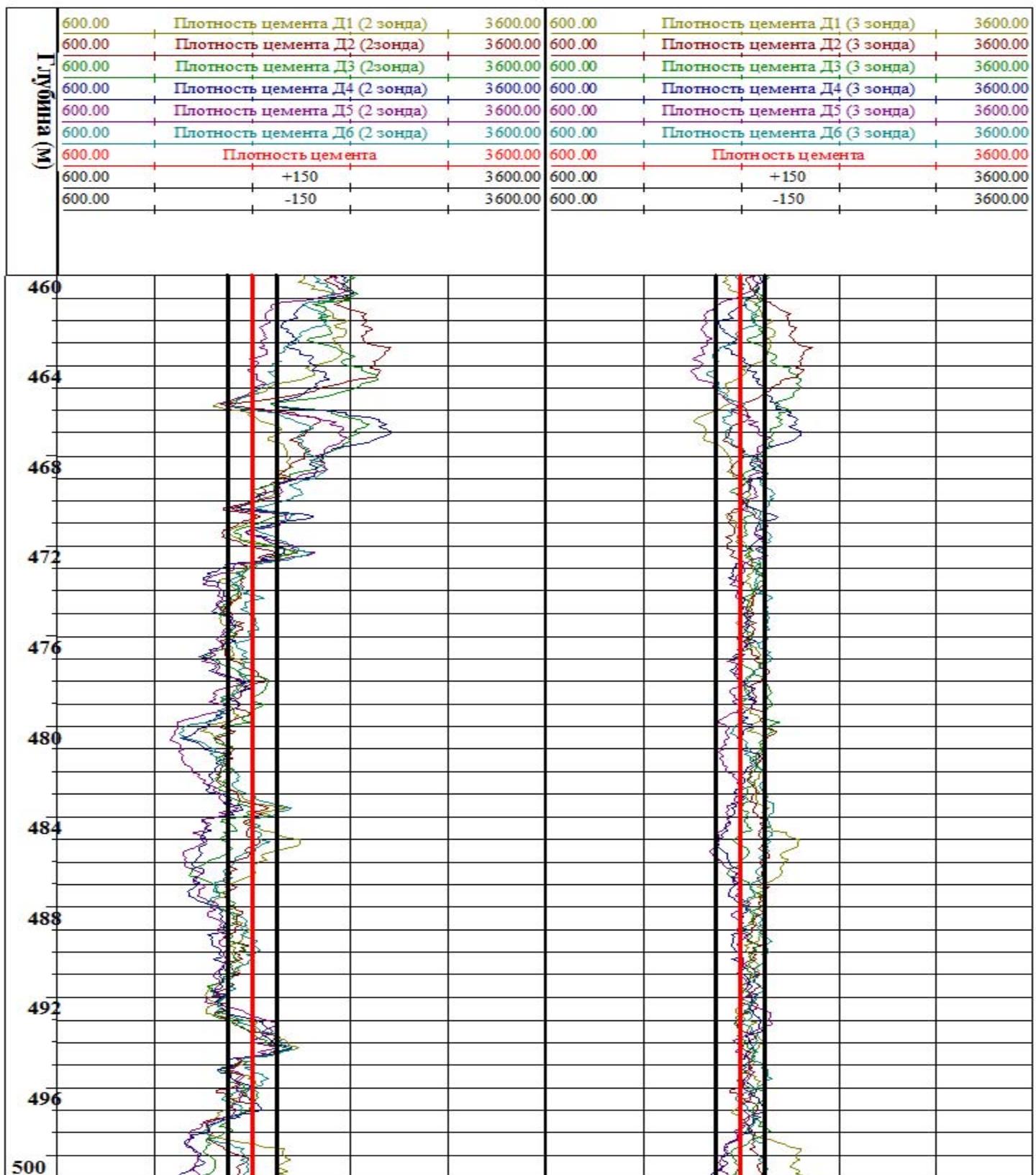


Рис. 3.21д. Сравнение результатов определения плотности цементного камня в газовой скважине, полученной двухзондовой и трехзондовой аппаратурой. Интервал глубин 460- 500 м.

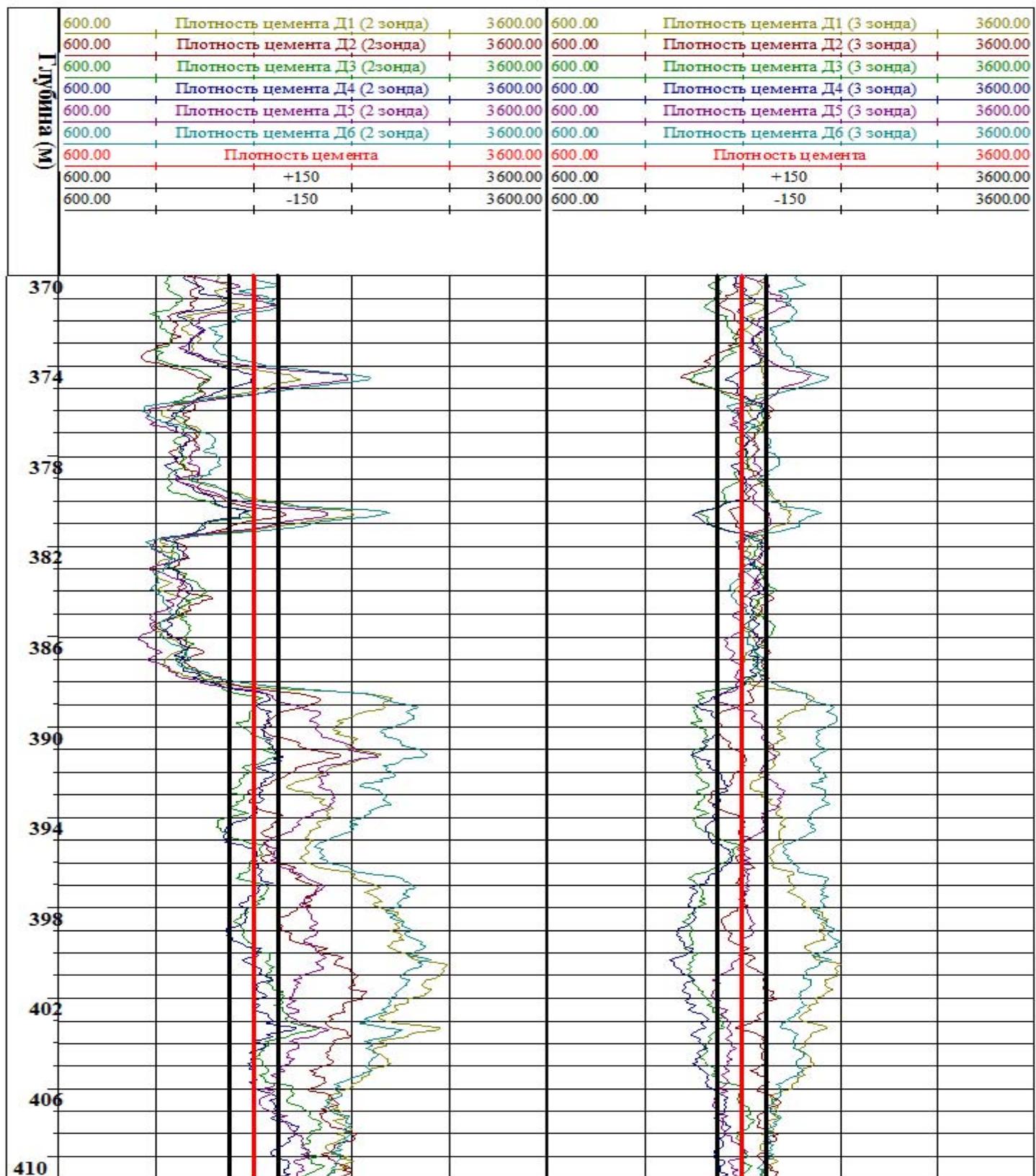


Рис. 3.21е. Сравнение результатов определения плотности цементного камня в газовой скважине, полученной двухзондовой и трехзондовой аппаратурой. Интервал глубин 370-410 м.

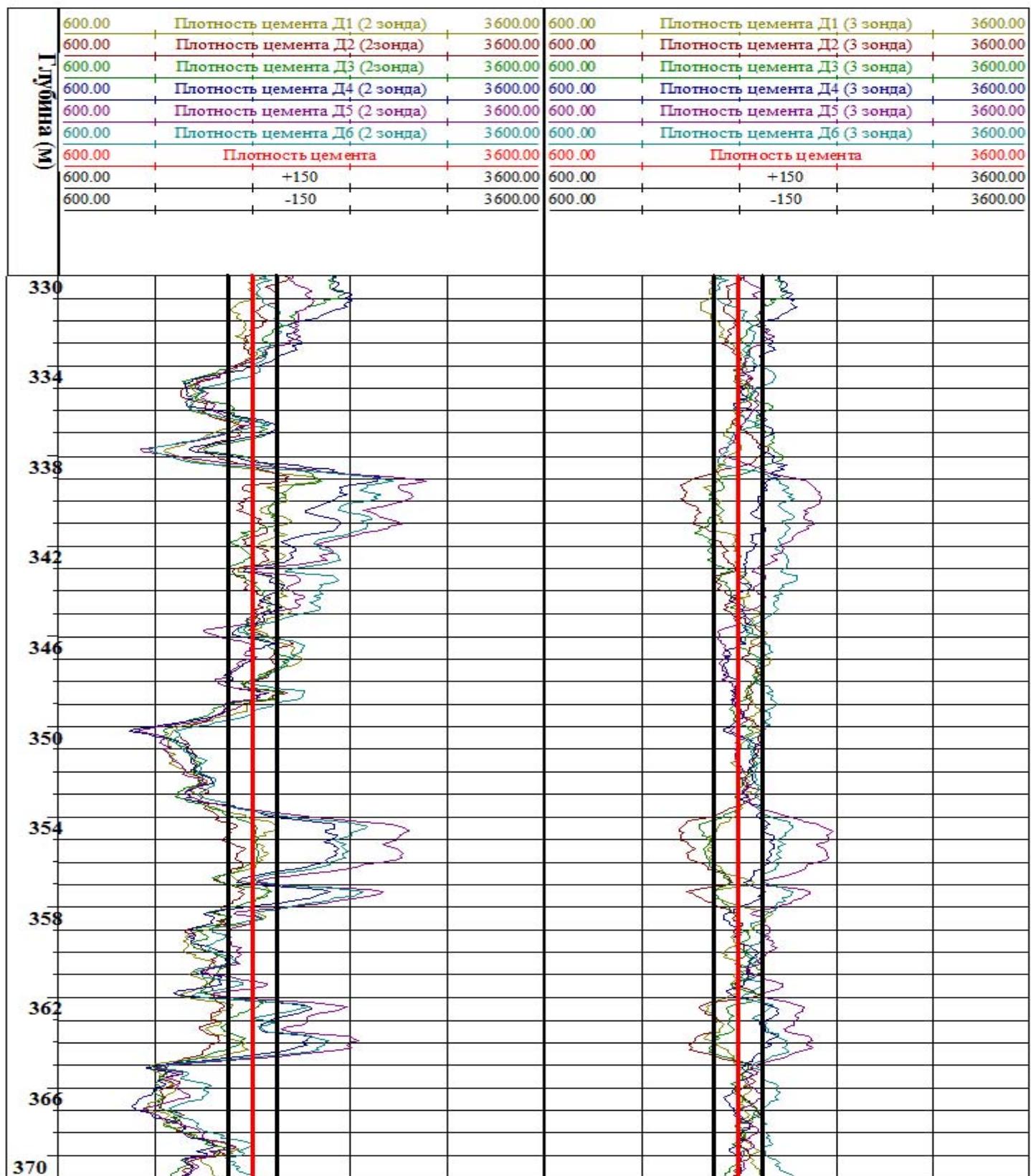


Рис. 3.21ж. Сравнение результатов определения плотности цементного камня в газовой скважине, полученной двухзондовой и трехзондовой аппаратурой. Интервал глубин 330- 370 м.

Выводы по главе 3

По результатам исследований, приведенных в главе III можно сделать следующие выводы:

- предложенная конструкция калибровочной установки для аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных нефтяных и газовых скважин гамма – гамма методом максимально приближена к реальной конструкции скважины;
- калибровочная установка позволяет построить градуировочные зависимости для аппаратуры типа СГДТ в диапазоне плотности породы $1000 - 2410 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- учет влияния плотности породы на результаты измерений аппаратурой по контролю технического состояния обсаженных скважин позволяет повысить точность определения толщины стенки и плотности цементного камня;
- установка внедрена и эксплуатируется в Центре метрологии и сертификации ООО «Газпром георесурс»;
- разработано устройство для тестирования аппаратуры типа СГДТ, позволяющее проводить оперативное тестирование аппаратуры непосредственно перед спуском в скважину и на удаленных участках проведения работ, помимо упрощения процедуры калибровки, за счет малого количества используемого гамма-активного вещества, устройство снижает радиационную нагрузку на персонал.
- разработан и испытан полноразмерный макет трехзондовой аппаратуры по контролю технического состояния обсаженных скважин гамма-гамма методом, который позволяет проводить оценку технического состояния обсаженных скважин за одну спускоподъемную операцию без привлечения дополнительных данных о плотности породы.

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 процедуру проводить измерение трех значений плотности породы и эффективного атомного номера. Это позволяет снизить стоимость изготовления образцов, их весогабаритные характеристики и уменьшить радиационную нагрузку на персонал, без ущерба для точности измерений.

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. Предложенная 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.

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

2ГГКП	Двухзондовый прибор плотностного гамма-гамма каротажа производства ООО «Нефтегазгеофизика»
3ГГКЛП	Трехзондовый прибор литоплотностного гамма-гамма каротажа производства ООО «Нефтегазгеофизика»
ГГК	Гамма-гамма каротаж
ГГК2	Двухзондовый прибор плотностного гамма-гамма каротажа производства НПФ «Геофизика»
ГГК2-ЛП	Двухзондовый прибор литоплотностного гамма-гамма каротажа производства НПФ «Геофизика»
ГГК-ЛП	Литоплотностной гамма-гамма каротаж
ГГК-П	Плотностной гамма-гамма каротаж
ГИС	Геофизические исследования скважин
ГСО-ПНС	Государственные стандартные образцы плотности
КУ-СГДТ	Калибровочная установка для аппаратуры СГДТ
КУ-ЦМ	Калибровочная установка для аппаратуры ЦМ
МОС	Модель обсаженной сткважины
РГП	Двухзондовая аппаратура плотностного каротажа
СГДТ	Скважинный гамма дефектомер толщиномер
СГДТ-ТЕСТ	Устройство для тестирования аппаратуры типа СГДТ
СГП2-АГАТ	Двухзондовый прибор плотностного гамма-гамма каротажа производства
СО	Стандартные образцы
СОГГК-ЛП	Стандартные образцы плотности и эффективного атомного номера горных пород.
СОП	Стандартные образцы плотности горных пород
СО-ТП	Стандартные образцы толщины стенки колонны и плотности заколонного пространства.
УПТП	Установка поверочная толщины стенки колонны и плотности заколонного пространства.
ФЭУ	Фотоэлектронный умножитель
ЦМ	Цементомер

ЛИТЕРАТУРА

1. Варварин Г.Б., Филиппов Е.М. Плотностной гамма-гамма-метод в геофизике. Новосибирск, «Наука», 1972, 327с.
2. Баэмбитов Ф.Г., Гулин Ю.А., Дядькин И.Г. Опыт применения ГГК в Башкирии. – Сб. «Прикладная геофизика», вып. 17 Гостоптехиздат, 1957, 284-292с.
3. Барсуков О.А., Блинов Н.М., Выборных С.Ф., Гулин Ю.А., Дахнов В.Н., Ларионов В.В., Холин А.И. Радиоактивные методы исследования нефтяных и газовых скважин. Гостоптехиздат, 1958, 314с.
4. Гречухин В.В. Геофизические методы исследования угольных скважин. «Недра», 1965, 467с.
5. Гулин Ю.А. Количественная интерпретация данных радиометрии скважин. – Сб. «Разведка и разработка полезных ископаемых». Гостоптехиздат, 1958, 98-110с.
6. Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. Недра, 1982, 448с.
7. Денисов Н.И., Рыжов Н.В., Скаткин В.М. Измеритель скорости счета с диодной переключающей схемой. – Инф. Бюлл. СНИИПа, 1965, № 10-11.
8. Пикkel Дж., Хикокк Дж. Изучение плотностей горных пород методом рассеянного гамма-излучения. – Сб. «Промысловая геофизика», вып. 4. Гостоптехиздат, 1962, 178с.
9. Филиппов Е.М. Гамма-гамма каротаж. Применение радиоактивных изотопов и излучений в нефтяной промышленности. – Сб. докл. Гостоптехиздат, 1957, с. 150-158.
10. Филиппов Е.М. Некоторые вопросы методики и теории гамма-гамма метода. – Сб. «Ядерная геофизика». Гостоптехиздат, 1959, с. 306-332.
11. Баэмбитов Ф.Г., Гулин Ю.А., Дядькин И.Г. Определение высоты подъема цемента в скважинах по данным гамма-гамма каротажа. – В кн.: Развед. и промысл. геофизика, вып. 32. Гостоптехиздат, 1959, с. 55-59.

- 12.Гулин Ю.А., Бернштейн Д.А., Соколов Ю.И. Новая методика и аппаратура для исследования цемента за колонной в крепленых скважинах. Гостоптехиздат, 1961,
- 13.Бернштейн Д.А., Семенов Е.В., Семенова Т.М. и др. Комплексная аппаратура для контроля качества цементирования и технического состояния обсадных колонн. – В кн.: Геофизическая аппаратура, вып. 50 «Недра», 1972, С.12-19.
- 14.Бернштейн Д.А., Гулин Ю.А., Колесниченко В.П. и др. Измерение толщины стенки и внутреннего диаметра обсадных колонн методом рассеянного гамма-излучения. – В кн.: Геофизические методы контроля разработки нефтяных месторождений. Уфа, изд. Баш. гос. ун-та, 1969.
- 15.Бернштейн Д.А., Гулин Ю.А., Жувагин И.Г. и др. Контроль технического состояния обсаженных скважин методом рассеянного гамма-излучения. В кн.: Выделение продуктивных пластов методами ядерной геофизики в обсаженных скважинах. Саратов, изд. Нижне-Волжского науч.-исслед. ин-та геологии и геофизики, 1971, 304с.
- 16.Скважинный гамма-дефектомер толщиномер СГДТ-2. – «Каталог геофизической аппаратуры». «Недра», 1972.
- 17.Грумбков А.П., Зотов А.Ф., Хаматдинов Р.Т. Анализ геолого-технических условий проведения плотностного гамма–гамма каротажа нефтяных и газовых скважин. Деп. ВИНТИ, № 2645-85, 1985.
- 18.Гулин Ю.А. Комплекс радиометрических исследований песчано-глинистых отложений в нефтяных скважинах. Изд. «Наука», Сибирское отделение, Новосибирск. 1972, С.302-311.
- 19.Аппаратура плотностного гамма-гамма каротажа нефтегазовых скважин. Параметры, характеристики, требования. Методы контроля и испытаний. М.: СТ ЕАГО-030-01 1996, 29с.
- 20.Булашевич Ю.П., Захарченко В.Ф., Сенько-Булатный И.Н., Уткин В.И. Ядерно-геофизические методы бескернового изучения вещественного состава пород и руд и опыт их применения на рудных и угольных месторождениях. Сб. Ядерная геофизика. Атомиздат, 1972, 280с.

21. Воскобойников Г.М. Теоретические основы селективного гамма-гамма каротажа. Изв. АН СССР, Сер. Геофизическая, 1957, № 3, С. 351-362.
22. Гулин Ю.А. Гамма-гамма метод исследования нефтяных скважин. М.: Недра, 1975 г., 160 с.
23. Уткин В.И. Селективный гамма-гамма каротаж на угольных месторождениях. М.: Наука, 1975, 244с.
24. Фано У., Спенсер Л., Бергер М. Перенос гамма-излучения. М.: Госатомиздат, 1963, 284с.
25. Гулин Ю.А., Орехов О.Р., Семёнов Е.В. Аппаратура для плотностного каротажа нефтяных скважин. В сб.: Геофизическая аппаратура. вып. 53. Л Недра ,1973.
26. А.М. Блюменцев, Г.А. Калистратов, В.М. Лобанков, В.П. Циульников Метрологическое обеспечение геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1991. – 266 с.
27. Хаматдинов В.Р. Разработка аппаратуры и технологии литолого-плотностного гамма-гамма каротажа нефтегазовых скважин. Диссертация к.т.н. Тверь 2005 г.
28. Методические указания по проведению плотностного гамма-гамма каротажа в нефтяных и газовых скважинах аппаратурой СГП2-АГАТ и обработке получаемых результатов. Р.Т.Хаматдинов, А.Ф.Зотов, Ф.Х.Еникеева. Калинин, ВНИГИК, 1987, 42с.
29. Резванов Р.А. Радиоактивные и другие неэлектрические методы исследования скважин. Учебник для вузов. М., Недра, 1982. 368 с.
30. Варварин Г.Б., Кузнецов Г.А., Филиппов Е.М. Исследования по исключению влияния ближней зоны на результаты гамма-гамма-метода. – «Геология и геофизика», 1966, № 6, С.106-114.
31. Алексеев И.А., Головатская И.В., Гулин Ю.А., Ядерная геофизика при исследовании нефтяных месторождений. М.: Недра, 1978, 359с.

- 32.Методическое пособие по проведению гамма-гамма каротажа в нефтяных и газовых скважинах аппаратурой РГП-2 и интерпретации результатов измерений. И.В. Головацкая, Ю.А. Гулин, Калинин, ВНИИГИС, 1976.
- 33.Определение ёмкостных свойств и литологии пород в разрезах нефтегазовых скважин по данным радиоактивного каротажа (наставление по интерпретации с комплексом палеток). И. В. Головацкая, Ю.А. Гулин, Ф.Х. Еникеева, В.А. Велижанин и др. Калинин, изд-во ВНИГИК, 1984, 112с.
- 34.Филиппов Е.М. Прикладная ядерная геофизика. М.: изд. АН СССР, 1962, 580с.
- 35.Воскобойников Г.М. Каротажный снаряд с автономно перемещающимся выносным блоком. – Тр. Института геофизики УФАН СССР Свердловск, Вып. 3, 1965, С. 207-211.
- 36.Двухканальная радиометрическая аппаратура НК и ГГК. – В кн.: Вопросы разработки нефтяных месторождений и добычи нефти. Уфа, Башкнигоиздат, 1960. Авт. Ю. А. Гулин, Ю. И. Соколов, А. Ф. Ведехин и др., С.24-32.
- 37.Гулин Ю.А. Плотностной гамма-гамма каротаж разрезов нефтяных скважин. – «Тематические обзоры. Сер. регион. развед. геофизика». М., изд. Всесоюз. ин-та экономики минерального сырья и геол. разв. работ, 1973 г. 20с.
- 38.Хаматдинов Р.Т., Камаев В.Е., Велижанин В.А., Зотов А.Ф. Теоретические и экспериментальные исследования при разработке образцов плотности для метрологического обеспечения плотностного гамма-гамма каротажа нефтяных и газовых скважин. Деп. ВИНТИ, № 8572-В, 1985.
- 39.Хаматдинов Р.Т., Камаев В.Е., Велижанин В.А., Зотов А.Ф. Государственные стандартные образцы плотности для метрологического обеспечения плотностного гамма-гамма каротажа нефегазовых скважин. В сб. тезисов Метрология и метрологическое обеспечение измерений параметров объектов нефтепромысловой геофизики. Уфа, ВНИИНефтепромгеофизика, 1986.
- 40.Святохин В.Д. Совершенствование метрологического обеспечения нейтронного каротажа. Автореферат дисс. к.т.н. Уфа, 2008г., 24с.

- 41.Широков В.Н., Лобанков В.М. Метрология, стандартизация, сертификация: Учебник. – М.: МАКС Пресс, 2008, 498 с.
- 42.Лобанков В.М., Святохин В.Д. Эталонные модели пластов и скважин для нефтепромысловой геофизики// Нефтегазовое дело. – Том 5. № 2. 2007, С.71-76.
- 43.Гулин Ю.А., Бернштейн Д.А., Прямов П.А., Рябов Б.М. Акустические и радиометрические методы определения качества цементирования нефтяных и газовых скважин. – М.: Недра, 1971, 112с.
- 44.АЯЖ 2.806.004-03 РЭ Гамма плотномер толщиномер скважинный СГДТ-НВ. Руководство по эксплуатации. Уфа 2009г, 61с.
- 45.Бернштейн Д. А. Применение метода рассеянного гамма-излучения для детального исследования цементного кольца за колонной нефтяных скважин. Труды ВНИИЯГГ вып. №7 изд. «Недра», М. 1969 г. с. 163-178.
- 46.Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах. М.: 2001, 272с.
- 47.Садков В.Г., Филин Н.И., Бернштейн Д.А., Евдокимов В.И. Установка поверочная для скважинных гамма-дефектомеров-толщиномеров. Труды БашНИПИнефть, ВНИИнефтепромгеофизика «Повышение эффективности изучения скважин геофизическими методами» Уфа, 1980 г., с. 179-185
- 48.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.
- 49.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.
- 50.Арцыбашев В.А., Иванюкович Г.А. Сцинтилляционные спектры рассеянного гамма-излучения точечных источников. М.: Атомиздат. 1969, 108с.

51. Воскобойников Г.М. Интенсивность гамма-излучения в однородной излучающей среде. Труды горно-геологического ин-та УФАН СССР, вып 30, Геофиз. Сб. № 2, Свердловск, 1957, С.162-172.
52. Вяземский В.О., Ломоносов И.И., Писаревский А.Н., Протопопов Х.В., Рузин В.А., Тетерин Е.Д. Сцинтилляционный метод в радиометрии. М.: Госатомиздат, 1961, 436с.
53. Калашников В.И., Козодаев М.С. Детекторы элементарных частиц. М.: Наука, 1966, 241с.
54. Ларионов В.В. Радиометрия скважин. М.: Недра, 1969, 328с.
55. Матвеев В., В., Хазанов Б.И. Приборы для измерения ионизирующих излучений. Изд. 2. М.: Атомиздат, 1972, 708с.
56. Уткин В.И. Спектр рассеянного гамма излучения на малых расстояниях от источника. Атомная энергия, 1970, 29, вып. 1, 38с.
57. Дядькин И.Г. К теории гамма-гамма каротажа буровых скважин. "Изв. АН СССР. Сер. геофизическая". 1955, 4, с.4-8.
58. 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.
59. Патент на полезную модель № 136196 У1 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.
60. Патент на полезную модель № 136486 У1 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.

61. 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.
62. Патент на полезную модель №90576 У1 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.
63. 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
64. 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.
65. Патент на полезную модель № 157298 У1 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
66. Bertozzi W., Ellis D.V., Wahl J.S. The physical foundation of formation lithology logging with gamma rays. Geophysics, vol. 46, no. 10, 1981, p.1439-1455.
67. Lehtihet H.E., Altman J.C., Quarles C.A. Laboratory measurement of photoelectric absorption index. - 28th annual SPWLA symposium, July 1987.
68. Moake G.L., Definition of an improved lithology factor and laboratory technique for its measurement. - 29th annual SPWLA symposium, July 1988.

69. Schultz W.E., Nunley A., Kampfer J.G., Smith H.D. Dual-detector lithology measurements with a new spectral density log. – 26th annual SPWLA symposium, June 1985.