

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Нгуена Дык Аня «Разработка блоков проточного анализатора и методик экспресс-контроля характеристик нефти и газоконденсата методом ПМР», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8 — Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эффективное управление процессами добычи и транспорта углеводородов в рамках современной концепции «Цифровых месторождений» (ЦМ) требует внедрения высокоточных систем непрерывного неразрушающего контроля потока жидкости. Традиционные сепарационные, гидродинамические и радиоизотопные методы контроля фазовых расходов и физико-химических свойств (ФХС) скважинных флюидов обладают высокой погрешностью, радиационной опасностью или требуют длительного отбора проб, приводящего к потере представительности.

В связи с этим разработка отечественного автоматизированного мехатронного комплекса на базе протонного магнитного резонанса (ПМР), способного оперативно определять компонентный состав, вязкость, плотность и расходы фаз углеводородного сырья непосредственно на байпасных линиях скважин, является актуальной научно-технической задачей. Её решение имеет важное значение для обеспечения технологического суверенитета и цифровизации нефтегазовой отрасли Российской Федерации.

СТЕПЕНЬ ОБОСНОВАННОСТИ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ И ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Научные положения, выносимые на защиту, базируются на фундаментальных законах квантовой радиофизики и ядерной магнитно-резонансной релаксометрии. Обоснованность конструктивных решений подтверждается результатами трехмерного конечно-элементного моделирования магнитных систем в специализированном пакете *ANSYS Maxwell* и верифицирована калибровкой разработанных ВЧ-блоков с помощью векторного анализатора цепей *pnaVNA* (достигнут коэффициент

отражения ($S_{11} = -32$ дБ). Достоверность экспериментальных данных подтверждается представительным объемом испытаний, выполненных как на сертифицированных лабораторных приборах (*Bruker Minispec*), так и в условиях реальной опытно-промышленной эксплуатации на нефтях Поволжья и морских месторождений Вьетнама.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ И ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Научная новизна диссертационного исследования носит комплексный характер и заключается в получении следующих результатов:

- В области магнитных систем: научно обоснован метод расчета и оптимизации геометрии многослойных постоянных магнитов на базе структуры Хальбаха (МСХ), позволивший определить оптимальную высоту сборки по формуле ($L = r_{\text{конц}}\sqrt{6}$) и минимизировать массогабаритные параметры датчика при сохранении высокой индукции поля.

- В области приборостроения: разработана оригинальная сквозная архитектура малогабаритного измерительного комплекса ПМР-NP3 на базе ПЛИС *Xilinx Zynq-7020*, реализующая алгоритмы прямого цифрового синтеза импульсных последовательностей КПМГ, что исключило дрейф фазы, характерный для аналоговых трактов.

- В области методического обеспечения: экспериментально установлены и математически описаны аналитические зависимости изменения времен поперечной релаксации протонной фазы B от концентрации асфальтенов, а также зафиксированы точки структурно-динамических фазовых переходов в сложных нефтяных дисперсных системах (НДС).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Теоретическая значимость диссертации заключается в развитии научно-методических принципов проектирования, расчета и прецизионной термостабилизации малогабаритных низкочастотных ЯМР-релаксметров, функционирующих в составе распределенных интеллектуальных сетей.

Практическая значимость работы весьма высока и состоит в создании действующего промышленного прототипа автоматического байпасного анализатора порций флюида ПМРА-IV, превосходящего лучший

зарубежный аналог *Krohne MFMA-5000* по массогабаритным (30 кг против 1100 кг) и энергетическим (100 Вт против 350 ВА) показателям. Разработанные узлы защищены 3 патентами РФ на изобретения, тремя Свидетельствами Роспатента на программы для ЭВМ и успешно внедрены в деятельность ООО «ANAN» и учебный процесс ФГБОУ ВО «КГЭУ».

АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ПО ГЛАВАМ И ОЦЕНКА ЕЁ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ СТОРОН

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Она изложена на 183 страницах машинописного текста.

– **В первой главе** соискатель приводит подробный аналитический обзор научно–методических основ низкополевой ПМР-релаксометрии. Автором выполнен детальный системный анализ факторов, определяющих точность и стабильность измерений (включая влияние неоднородности полей (B_0) и (B_1), а также длительность переходных процессов в резонансных контурах). На основе критического разбора существующих аналогов аргументирован выбор низкополевого диапазона частот как оптимального компромисса для создания мобильных промышленных приборов контроля.

– **Во второй главе** сосредоточен основной объем приборостроительных и схемотехнических, результатов автора. К несомненным достоинствам главы относится успешная модернизация радиоэлектронных блоков релаксометра ПМР-NP3. Соискателем осуществлен полный переход от нестабильной аналоговой технологии формирования импульсов к прямому цифровому синтезу на базе микросхемы *AD9854* и ПЛИС *Xilinx Zynq-7020*. Высокий инженерный уровень соискателя подтверждается решением проблемы сокращения времени затягивания фронтов РЧ-импульсов до уровня менее 250 нс за счет внедрения специализированных *MOSFET*-транзисторов *RD16HHF1*. Также заслуживает высокой оценки разработка сопутствующих узлов: оригинального измерителя индукции до 1,25 Тл и автоматического стабилизатора температуры на элементах Пельтье.

– **В третьей главе** соискатель детально описывает интеграцию блоков в законченный комплекс ПМРА-IV, предназначенный для дискретного порционного анализа в обводной линии. Важным практическим результатом является создание оригинального мехатронного модуля пробоотбора с

подвижным патрубком, решившего задачу репрезентативности многофазной пробы. Особого внимания заслуживают результаты исследования узла предварительной магнитной поляризации потока на структурах Хальбаха, позволившего существенно повысить уровень регистрируемого ЯМР-сигнала водной фазы флюида. Научно-практический интерес представляет подраздел 3.4, в котором соискатель обосновывает системную интеграцию ПМРА-IV в технологические контуры управления установками электроцентробежных насосов (УЭЦН).

– В четвертой главе приведены результаты прикладного применения разработанного комплекса. Большую ценность представляют данные экспресс-контроля изменения ЯМР-параметров при изменении содержания асфальтенов и парафинов в тяжелых нефтях Вьетнама, позволяющие оперативно прогнозировать риски запарафинивания морских нефтепроводов. На основе анализа температурных зависимостей автором успешно зафиксированы точки структурно-динамических фазовых переходов в газоконденсатах флюидов. Практическая значимость главы подкреплена созданием физических модулей связи на контроллерах *ESP32* с поддержкой *LoRa*-технологий.

Соответствие автореферата содержанию диссертации и полнота публикаций

Автореферат полностью и адекватно отражает содержание диссертационной работы. По теме исследования опубликовано 39 печатных работ, включая 3 статьи в базах *Scopus/WoS*, 4 статьи в журналах из перечня ВАК РФ (К1, К2), а также 3 патента РФ на изобретения и 3 Свидетельства государственной регистрации на программы для ЭВМ, что полностью удовлетворяет установленным требованиям.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

Несмотря на общую высокую научно-практическую ценность выполненного исследования, по материалам диссертации необходимо высказать следующие замечания, которые сгруппированы по степени их значимости.

Крупные (научно-методические) замечания:

1. Автор классифицирует систему как «проточную» и вводит формулы динамического расхода фаз через скорости их непрерывного движения (v_i) (подраздел 3.3, стр. 97). Однако из описания конструкции пробоотборного

модуля (стр. 96-98) однозначно следует, что измерение характеристик КПМГ выполняется дискретно, в порционном квазистатическом режиме (в покое), после циклического отсечения и полной остановки флюида внутри датчика. В условиях статического измерения отдельных порций флюида введение индивидуальных скоростей i -ых фаз и использование формулы расхода в виде $Q_i = v_i S/t$ теряют физический смысл. Кроме того, сама формула расхода содержит размерную ошибку.

2. Автор строит эмпирические зависимости концентрации асфальтенов (Асф) от времени релаксации так называемой «фазы В» (T_{2B}), значения которого лежат в диапазоне сотен миллисекунд (подраздел 4.1, стр. 111-112). Однако истинное время (T_2) твердых агрегированных асфальтенов составляет не более 20 – 30 микросекунд. С учетом того, что шаг (τ_1) в применяемой автором последовательности КПМГ равен 300-500 мкс (стр. 114), ЯМР-сигнал от самих асфальтенов полностью затухал внутри «мертвого времени» прибора и соискателем не регистрировался. Таким образом, регистрируемая «фаза В» представляет собой не асфальтены, а, в лучшем случае, протоны подвижной сольватной оболочки смол и масел.

3. Разработанная автором схема дистанционного мониторинга (п. 4.5 и 4.6), согласно которой выгрузка технологических данных о параметрах добычи нефти осуществляется на сторонний бесплатный зарубежный хостинг *Somee.com* (стр. 127), представляет собой опасную уязвимость и напрямую противоречит требованиям ФЗ-187 «О безопасности КИИ РФ». Предложенный в п. 3.5 экономический анализ носит сугубо декларативный и умозрительный характер, в котором не учитываются реальные затраты на взрывозащиту и метрологическую сертификацию.

Мелкие (редакционные и технические) замечания:

1. Автору следует учесть, что законы масштабирования Фрида, приведённые в подразделе 1.6.4 (стр. 29-30) носят сугубо идеализированный характер, в которых игнорируются реальные межмолекулярные взаимодействия.

2. На рисунке 2.31 (стр. 71) нарушены правила ЕСКД в части сквозной нумерации элементов (диоды начинаются с $D10$), а присутствующий на схеме защитный диод $D11$ вообще не описан в тексте. Кроме того, желательно было бы проанализировать схему на предмет линейности характеристики детектирования.

3. В подразделе 3.2 (рис. 3.3, стр. 94) автор ошибочно именуется силовую

характеристику поля – магнитную индукцию (в Теслах) – «намагниченностью потока», которая в системе СИ измеряется в А/м.

4. Иллюстративный график на рисунке 4.4 (стр. 118) выполнен без указания номеров кривых, а приводимая кривая проявления минимума (T_{1A}) никак не пояснена в тексте. Эмпирическая формула (4.2) для образцов нефти Вьетнама выведена на основе обработки результатов измерения всего трех образцов, что снижает статистическую репрезентативность тренда.

5. Следует заметить, что зависимости, приведенные на рисунках 4.2 – 4.4, выгоднее и физически более правильно представлять в полулогарифмических координатах. Подпись к рисунку 4.2 сформулирована некорректно (аргумент перепутан с функцией).

6. Описывая температурную зависимость времен релаксации (рис. 4.3, стр. 117), соискатель ошибочно классифицирует результирующую кривую «в виде суммы низкотемпературных и высокотемпературных времен». Хотя на самом деле линейному суммированию подлежат скорости релаксации (величины $(1/T_{1,2})$), но не сами времена.

7. В тексте работы допущена небрежность верстки: полностью пропущен подраздел 4.4, а на стр. 132 и 134 два разных рисунка ошибочно названы одним номером «Рисунок 4.13». В оглавлении (стр. 3, п. 4.2) присутствует орфографическая опечатка в слове «Аанализ».

Все зафиксированные замечания носят преимущественно дискуссионный характер и ни в коей мере не умаляют главный научно-практический результат диссертации соискателя — создание работоспособного отечественного малогабаритного автоматизированного комплекса ПМР-NPЗ с прецизионной системой термостабилизации на элементах Пельтье для экспресс-диагностики ФХС углеводородных сред.

В качестве совета автору на будущее хотелось бы отметить, что некоторые избыточные и сугубо вспомогательные разделы диссертации (например, такие, как подраздел 3.5 по декларативной экономике и подраздел 4.3 по компилятивному описанию портов коммерческих плат *Raspberry Pi*) можно было бы без какого-либо ущерба вообще не включать в текст диссертационной работы. От этого структура диссертации только выиграла бы, став более лаконичной, а количество критических замечаний со стороны оппонентов было бы существенно меньше. Это наглядно демонстрирует, что основные претензии относятся к факультативным, а не к базовым радиофизическим и приборостроительным разделам работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Нгуена Дык Аня является самостоятельным, законченным научно-квалификационным исследованием, выполненным на высоком профессиональном уровне. В ней решена актуальная задача разработки блоков ПМР–анализатора углеводородных сред для байпасных измерительных систем.

По своей актуальности, объему выполненных исследований, научной новизне и практической значимости диссертация полностью отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, в редакции от 16.10.2024 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, **Нгуен Дык Ань**, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности **2.2.8 — Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.**

Доктор физико-математических наук,
профессор,
зав. кафедрой физики молекулярных
систем ФГАОУ ВО «Казанский
(Приволжский) федеральный
университет
Скирда Владимир Дмитриевич

31/09/2026

(Подпись)

420008, Россия, Республика Татарстан,
г. Казань, Кремлевская, д. 16а
Тел. +7 (987) 227–52–39,
Эл. почта: kazanvs@mail.ru

