

На правах рукописи



Нгуен Дык Ань

**РАЗРАБОТКА БЛОКОВ ПРОТОЧНОГО АНАЛИЗАТОРА И МЕТОДИК
ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК НЕФТИ И
ГАЗОКОНДЕНСАТА
МЕТОДОМ ПМР**

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Приборостроение и мехатроника»

Научный руководитель: **Кашаев Рустем Султанхамитович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Приборостроения и мехатроника» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Официальные оппоненты: **Скирда Владимир Дмитриевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики молекулярных систем ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань

Давыдов Роман Вадимович, кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы управления кибер-физическими системами ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева – КАИ», г. Казань

Защита диссертации состоится «25» сентября 2026 г. в 11 час 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.310.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д-224.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.01.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ: <https://kgeu.ru/struktura-vuza/dissertatsionnye-sovety/dissertatsionnyy-sovet-24-2-310-01/soiskatel-nguen-dyk-an/>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.ф.—м.н



Калимуллин Рустем Ирекович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

В соответствии с приоритетами развития топливно-энергетического комплекса, отражёнными в «Энергетической стратегии России до 2050 года», особое внимание уделяется обеспечению технологического суверенитета и внедрению отечественных технологий при разработке трудноизвлекаемых запасов углеводородов. Реализация положений распоряжения Правительства РФ №1632 от 28.08.2017 г. «Цифровая экономика РФ» обуславливает актуальность цифровизации нефтегазовой отрасли и формирования «Цифровых месторождений» (ЦМ) [1], основанных на интеграции систем мониторинга и управления с применением больших данных, промышленного Интернета вещей (ПИВ) и цифровых моделей. По оценкам отраслевых исследований, внедрение таких решений способствует увеличению добычи нефти на 10–25% и снижению энергетических потерь до 8%.

Однако существующие в настоящее время методы контроля на нефтепромыслах не дают оперативной информации по всей номенклатуре характеристик нефти из-за отсутствия универсальных, неразрушающих образцы экспресс-анализаторов. Инструментальные методики имеют погрешности из-за непредставительного отбора проб, достигающие $\pm 30\%$, затрудненного сложной структурой потоков сырой нефти (СН), водонефтяных эмульсий и инверсией фаз. Сложности создает также расположение нефтяных месторождений на огромных территориях при недостатке инфраструктуры, что требует максимальной автоматизации процессов контроля.

Формирование единой системы измерений на ЦМ может быть осуществлено на базе неразрушающего, совмещающего в себе возможности нескольких анализаторов, автоматического программно-измерительного проточного комплекса, использующего метод ядерного (протонного) магнитного резонанса (ПМР), основанного на принципах квантовой радиофизики. В ЯМР отсутствуют зависимости квантово-магнитных свойств ядер (протонов) от морфологии образца. Параметры релаксации протонов коррелируют со многими свойствами нефти. Поэтому ЯМР широко используется для контроля в нефтяной индустрии. Нефти, различаясь химическим составом, с современных позиций представляют собой нефтяные дисперсные системы (НДС) разного типа [2], допускающие единый подход при их анализе.

Большой вклад в развитие теории и аппаратуры ядерного магнитного резонанса внесли отечественные ученые: профессора Чижик В.И., Вашман А.А., Пронин И.С., Волков В.Я., Калабин Г.А., Скирда В.Д. и др. Но из-за отсутствия серийного выпуска отечественных ЯМР-анализаторов основными их поставщиками являются зарубежные фирмы, что тормозит внедрение отечественных разработок и ведет к потере отечественного приоритета в приборостроении. Их конструктив и программное обеспечение практически недоступны модернизации. Наилучший зарубежный многофазный анализатор *MFMA-5000* фирмы *Krohne* [3] не обеспечивает измерений всей номенклатуры характеристик, является слишком массивным и неуниверсальным по выходному диаметру. В проточном ПМР-анализаторе релаксометр ПМР является основным контрольно-управляющим блоком, в котором очень многое зависит от магнита, одного из основных блоков, в котором располагается измерительный датчик.

Таким образом, актуальной является задача разработки усовершенствованного автоматического проточного анализатора для экспресс-контроля характеристик нефти и газоконденсата методом ПМР, обеспечивающего повышение точности,

оперативности и универсальности измерений в условиях цифровых месторождений.

Объектом исследования являются процессы неразрушающего проточного экспресс-контроля физико-химических характеристик нефти и газоконденсата методом ПМР в условиях промышленной эксплуатации и цифрового мониторинга.

Предметом исследования являются аппаратно-программные, конструктивные, схемотехнические и алгоритмические решения, реализуемые в блоках автоматического проточного ПМР-анализатора повышенной точности, информативности контроля физико-химических характеристик нефти и газоконденсата.

Целью работы является разработка аппаратно-методического обеспечения для автоматического экспресс-контроля характеристик нефти и газоконденсата путем создания и экспериментальной апробации проточного ПМР-анализатора с улучшенными метрологическими характеристиками при промышленной эксплуатации.

Для этого надо решить следующие задачи:

1. Разработать и научно обосновать новую структуру постоянного магнита, обеспечивающую уменьшение габаритов и массы, повышение объема зоны однородности и стабильности магнитного поля в зазоре, а также увеличение отношения сигнал/шум (С/Ш) при измерениях;

2. Разработать программное обеспечение и схемотехнику электронных блоков релаксометра ПМР на основе современной элементной базы и прямого цифрового синтеза, а также разработать измеритель индукции магнитного поля для повышения точности измерений и термостабилизатор для обеспечения температурной стабильности магнитного поля;

3. Разработать автоматический приборно-программный комплекс ПМРА-IV с автоматическим управлением блоками анализатора, цифровой обработкой сигналов;

4. Разработать усовершенствованный проточный модуль пробоотбора с внутренним байпасом и блоком управления пробоотборным патрубком, обеспечивающий повышение представительности пробы и устойчивости измерений в реальных условиях эксплуатации;

5. Провести апробацию разработанных методик и технических средств проточного ПМР-анализатора на образцах нефтей Поволжья, а также нефтей и газоконденсата Вьетнама с оценкой их физико-химических характеристик;

6. Предложить схему применения ПМРА-IV в системе промышленного Интернета вещей на цифровом месторождении.

Методы исследования Для решения поставленных задач применялся теоретический анализ для обоснования конструкции и оптимизации параметров магнитов, датчиков и электронных блоков релаксометра ПМР в составе ПМРА-IV. Для численного моделирования магнитного поля электронных схем использовались программные средства: *ANSYS Maxwell*, *Proteus 8.7*, для обработки полученных данных *Advanced Grafer*. Методы проектирования и экспериментальных испытаний с использованием *Solid Works* и *Altium* применялись при разработке датчиков ПМР, электронных модулей и роботизированного пробоотборного устройства. Корректность работы узлов проверялась лабораторными испытаниями. Методы измерений и цифровой обработки сигналов реализованы в языке *C#* с использованием библиотеки *SciChart* для визуализации и *MySQL* для облачного хранения данных. Прикладные эксперименты проводились на образцах нефти месторождений России (Ромашкинское) и Вьетнама (*Bach Ho*, *Ca Ngu Vang*, газоконденсата *Tien Hai*).

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Научно обоснована и разработана многослойная магнитная структура Хальбаха (МСХ), обеспечивающая уменьшение габаритов и массы, а также повышение объема области однородности и стабильности магнитного поля в зазоре;
2. Разработан автоматический проточный анализатор ПМРА-IV, включающий усовершенствованные электронные блоки релаксометра, алгоритмы управления измерительным процессом и модуль пробоотбора с управляемым позиционированием, обеспечивающий повышение представительности пробы и достоверности измерений;
3. Разработаны и экспериментально подтверждены методики экспресс-контроля физико-химических характеристик нефти и газоконденсата на основе анализа параметров ПМР-релаксации, а также реализована интеграция анализатора в инфраструктуру промышленного Интернета вещей для дистанционного мониторинга и управления на цифровом месторождении.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в развитии методических принципов построения аппаратной части проточного анализатора ПМРА-IV, включая расчет магнитной системы и модернизацию электронных блоков релаксометра с применением прямого цифрового синтеза. Обоснованы требования к чувствительности и температурной стабильности измерений, что расширяет возможности релаксометров ПМР для экспресс-контроля нефти и газоконденсата. Подтверждено влияние предварительного подмагничивания потока на повышение отношения сигнал/шум водной фазы в водонефтяных смесях.

Практическая значимость работы заключается в разработке:

- 1) измерителя индукции магнитных полей, реализованного на основе линейного цифрового магнитного датчика, обеспечивающего расширенный диапазон измерений магнитной индукции, цифровую регистрацию и визуализацию измеренных параметров магнитных систем;
- 2) усилительных трактов релаксометра ПМР, включая усилитель мощности передатчика и малoshумящий, управляемый напряжением усилитель приёмника, обеспечивающих параметры импульсов и чувствительности регистрации сигналов;
- 3) автоматической системы дистанционного управления ПМРА-IV, реализованной на устройстве подключения к веб-серверу промышленного Интернета вещей, обеспечивающей интеграцию анализатора в структуру цифрового месторождения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана методика оптимизации магнитных систем проточного ПМР-анализатора на основе модели магнита Хальбаха, обеспечивающая уменьшение габаритов и массы и увеличение области однородности магнитного поля;
2. Разработана и экспериментально проверена архитектура релаксометра в составе проточного ПМР-анализатора ПМРА-IV, включающая модернизированные электронные блоки повышенной чувствительности и температурной стабильности;
3. Разработан и реализован автоматический проточный анализатор в режиме внутреннего байпаса с управлением режима измерений и пробоотборным модулем, обеспечивающий представительность пробы при анализе нефти и газоконденсата;
4. Разработаны и экспериментально апробированы методики экспресс-контроля характеристик нефти и газоконденсата месторождений Поволжья и Вьетнама с применением релаксометра ПМР и его интеграцией в структуру промышленного Интернета вещей для дистанционного мониторинга и управления на цифровом

месторождении.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует научной специальности 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды». Основные результаты исследования соответствуют следующим пунктам паспорта: 1 – Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды; 3 – Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды; 4 – Разработка методического, математического, программного, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования материалов, изделий, веществ и природной среды, экологического мониторинга природных и техногенных объектов, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды; 6 – Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии; 7 – Автоматизация технологий, приборов контроля и средств диагностирования, способствующая снижению трудоёмкости, увеличению оперативности и достоверности оценки эксплуатационного ресурса изделий, повышению уровня экологической безопасности окружающей среды.

Достоверность полученных результатов диссертации обеспечивается корректной постановкой задач, применением метода разработки схмотехники с использованием прямого цифрового синтеза, согласованностью экспериментальных данных с расчетами и непротиворечивостью фундаментальным основам и результатами других авторов.

Личный вклад автора. Соискателем лично или при его непосредственном участии изготовлена конструкция ПМРА-IV с автоматической системой пробоотбора, схмотехника и конструкция релаксометра ПМР в составе ПМРА-IV с системой термостатирования.

Реализация и внедрение результатов работы Результаты работы внедрены в деятельность предприятий ООО «ANAN» и ООО «ТХАНЬ ТАМ» во Вьетнаме, а также на кафедре «Приборостроение и мехатроника» ФГБОУ ВО «КГЭУ» и используются в учебном процессе. Получены патенты РФ № 2808801 «Магнит»; №2813962 «Способ и устройство для определения скоростей потока (расхода) и концентрации воды в водо-нефтяных смесях»; № 2860172 «Стабилизатор температуры для магнита и образцов с терморегулятором» и три свидетельства о госрегистрации программы для ЭВМ.

Апробация работы Основные результаты работы представлялись и докладывались на следующих Международных научно-практических конференциях: International University Scientific Forum Practice Oriented Science: UAE–RUSSIA–INDIA, 2023 г.; «Мехатроника, автоматика и робототехника», Санкт-Петербург, 2023 г.; «Теоретические и практические аспекты развития науки в современном мире», Санкт-Петербург, Март 2023 г.; «Технологический суверенитет и цифровая

трансформация в энергетике» ТЭФ, Казань, 2024–2025 гг.; «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» (ИНФО–2024), Сочи, 2024 г.; «Механика и машиностроение. Наука и практика», Санкт-Петербург, 2024 г.; «Исследовательская Инициатива», Петрозаводск, 2023 г.; «Всероссийский Аспирантско-магистерский научный семинар», Казань, КГЭУ, 2024 г.; «Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ», Казань, КГЭУ, 2022–2024 гг.; «Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения», Казань, 2024 г.; «Интеллектуальная энергетика», Томск, 2024 г.; «Тинчуринские чтения» «Энергетика и цифровая трансформация», Казань, КГЭУ, 2024–2025 гг.; «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 2025 г.; International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi 2025.

Публикации результатов исследования. По результатам выполненных исследований опубликовано 39 печатных работ, включая 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных SCOPUS/WoS (и приравненных к публикациям, входящим в перечень ВАК), 4 статьи в научных изданиях из перечня ВАК (К1, К2) по специальности диссертации, 3 статьи в прочих рецензируемых научных изданиях, 3 патента РФ, 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, 23 публикации в сборниках международных и всероссийских конференций. Полный перечень публикаций приведен в диссертации, список основных работ – в конце автореферата.

Объем и структура работы Диссертационная работа состоит из введения, 4–х глав, заключения, списка литературы, включающего 137 наименований, и 3 приложений. Содержит 183 страницу машинописного текста, 66 рисунков и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и степень ее разработанности, сформулированы цель, решаемые задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснованность и достоверность выводов и результатов, апробация, внедрение и структура работы.

В первой главе рассмотрены научные и методические основы низкополевой ПМР-релаксометрии, выполнен системный анализ факторов, определяющих точность и стабильность измерений при использовании компактных магнитных систем и цифровых ЯМР-спектрометров. Проанализированы особенности формирования ЯМР-сигнала, влияние неоднородности полей B_0 и B_1 , переходных процессов ВЧ-импульсов и параметров резонансных контуров, их влияние на точность определения времен релаксации. Рассмотрены методики измерения T_1 и T_2 , методы повышения отношения С/Ш и цифровой обработки данных. Обоснованы области практического применения ЯМР, прежде всего в нефтяной промышленности, и показана связь релаксационных параметров с ФХС углеводородных систем. На основе проведенного анализа сформулированы ограничения существующих систем и обоснована необходимость модернизации электронных блоков релаксометра и конструкции магнитной системы.

Во второй главе представлены методы расчета и проектирования многослойных магнитных систем на базе теории магнитов Хальбаха (рис. 1), направленные на уменьшение габаритов и массы, повышение зоны однородности

магнитного поля в рабочем зазоре. Разработан цифровой измеритель индукции магнитного поля в рабочем зазоре магнита в диапазоне измерений до 1,25 Тл (рис. 2), калибровку которого осуществляли по известным значениям магнитной индукции имевшихся магнитов.

Изменением числа неодимовых магнитов в слое можно менять индукцию магнитного поля и резонансную частоту ν_0 (для измерений на ядрах фтора ^{19}F используется $\nu_0 = 12,3$ МГц и $\nu_0 = 6$ МГц для фосфора ^{31}P) и диаметр внутримagnetного пространства (на разные диаметры трубопровода), а числом слоев менять объем V однородного пространства и соответственно чувствительность, определяемую по формуле $K = \nu_0^2 V$.

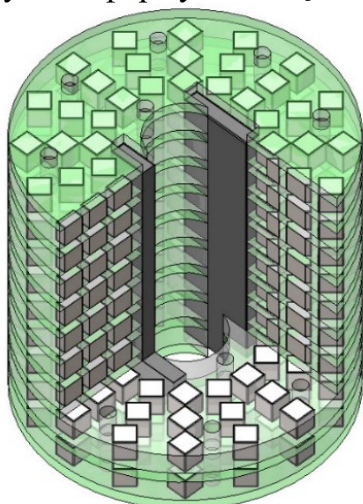


Рис. 1. Многослойный МСХ с 10 слоями

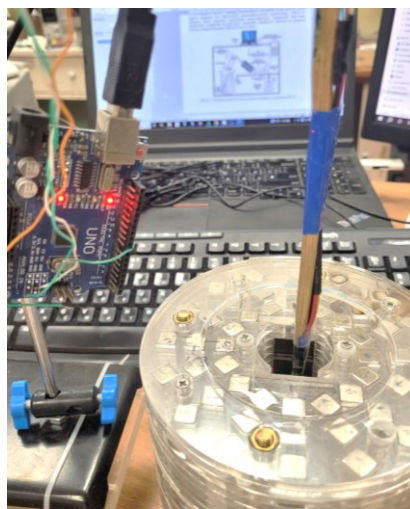


Рис. 2. Измеритель индукции магнитного поля

В главе также приведено описание схмотехнических электронных блоков ПМР-релаксометра и разработанных средств, обеспечивающих повышение стабильности его работы в условиях изменения температурного режима. Разработанный многослойный МСХ имеет габариты (длина×ширина× высота) 14×14×12 см и массу 4,5 кг. На рис. 3 показано значение неоднородности магнитного поля в зазоре МСХ вдоль оси z . По результатам измерений магнитного поля вдоль оси z в центре рабочего зазора получено значение индукции магнитного поля $B_0 = 0,3068$ Тл, что соответствует резонансной частоте ядер водорода $\nu_0 = 13,036$ МГц. Достигнута неоднородность магнитного поля $\Delta B/B_0 = 1500$ ppm в объеме $1,6 \times 1,6 \times 2,0 = 5,12$ см³ или $\Delta B/B_0 = 260$ ppm/см³.



Рис. 3. Значение неоднородности поля $\Delta B/B_0$ по оси z

На рис. 4 представлена функциональная блок-схема релаксометра, включающая: ПЛИС типа ZYNQ 7020, блок формирователя импульсных последовательностей (ФИП), блок передатчика, блок приемника, блок магнита, ПМР-датчик и переключатель приём/передача (П/П) с кабелем $\lambda/4$.

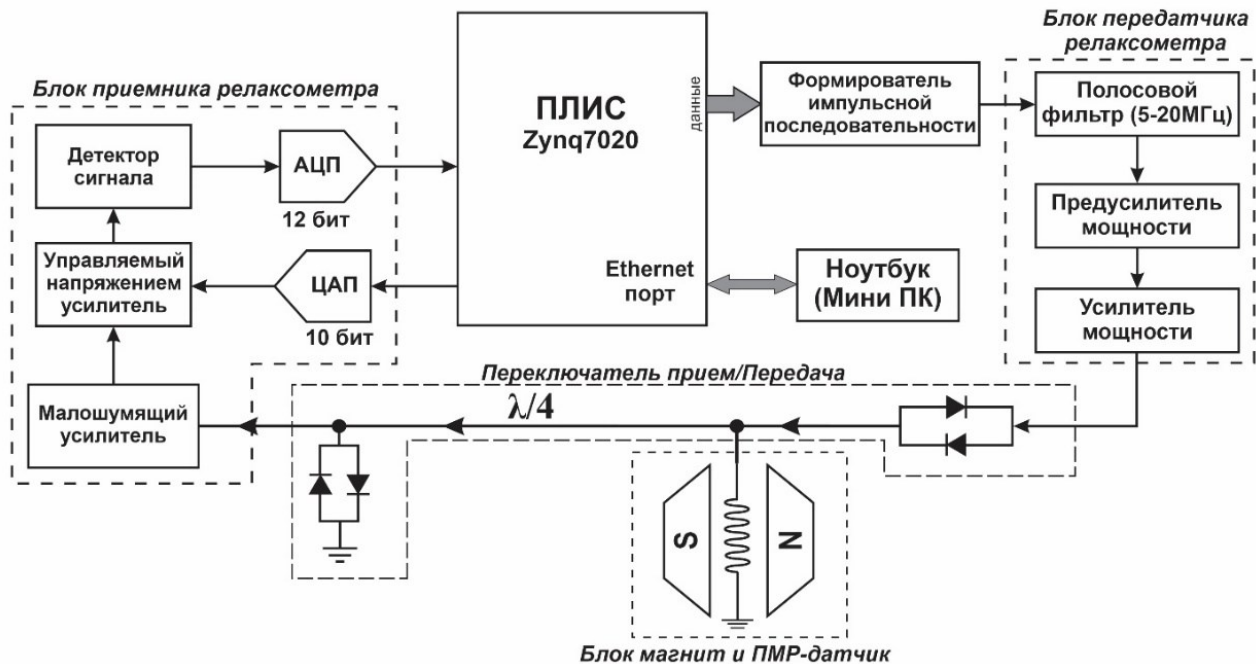


Рис. 4. Функциональная блок-схема усовершенствованного релаксометра

Импульсная последовательность КПМГ проходит через полосовой фильтр (5–20 МГц), далее через предусилитель и усилитель мощности и передается на ПМР-датчик посредством $\lambda/4$ переключателя П/П. Сигнал спин-эхо принимается ПМР-датчиком, затем усиливается и детектируется на приемнике и преобразуется в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), затем подается на ПЛИС и передается на персональный компьютер через интерфейс *Ethernet*, обеспечивая высокоскоростной и стабильный сбор данных.

Для разработки ФИП был использован метод прямого цифрового синтеза (ПЦС). На структурной схеме (рис. 5) представлен принцип построения формирователя импульсной последовательности ПМР-релаксометра, реализованного на основе специализированной микросхемы ПЦС AD9854. В результате получена последовательность импульсов КПМГ с формированием 90° -импульса и 180° -импульсов с точно заданными фазовыми углами.

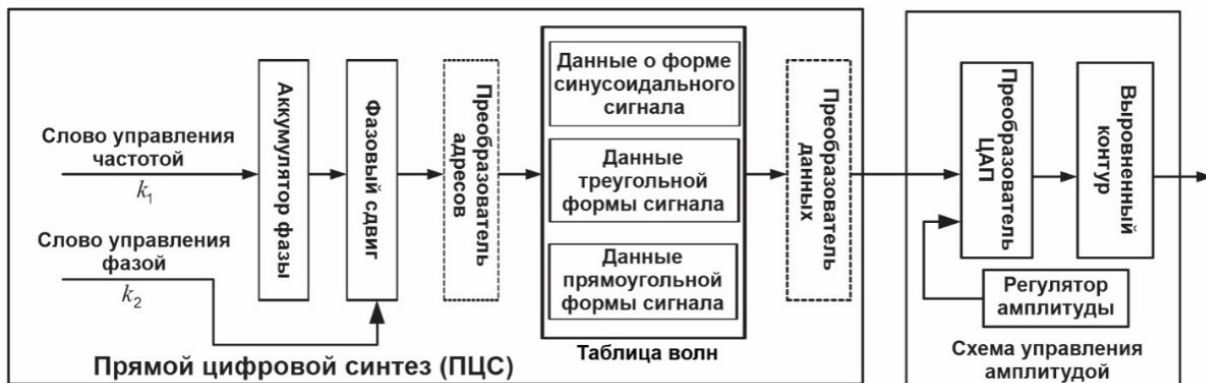


Рис. 5. Структурная схема формирователя импульсной последовательности

Полосовой фильтр выполнен по схеме 4-ого фильтра *Butterworth* и предназначен для удаления помех на выходе ФИП, а также для согласования выходного импеданса 50 Ом с входом усилителя мощности. Предусилитель восстанавливает амплитуды сигнала после фильтрации и его усиление до уровня, входа усилителя мощности.

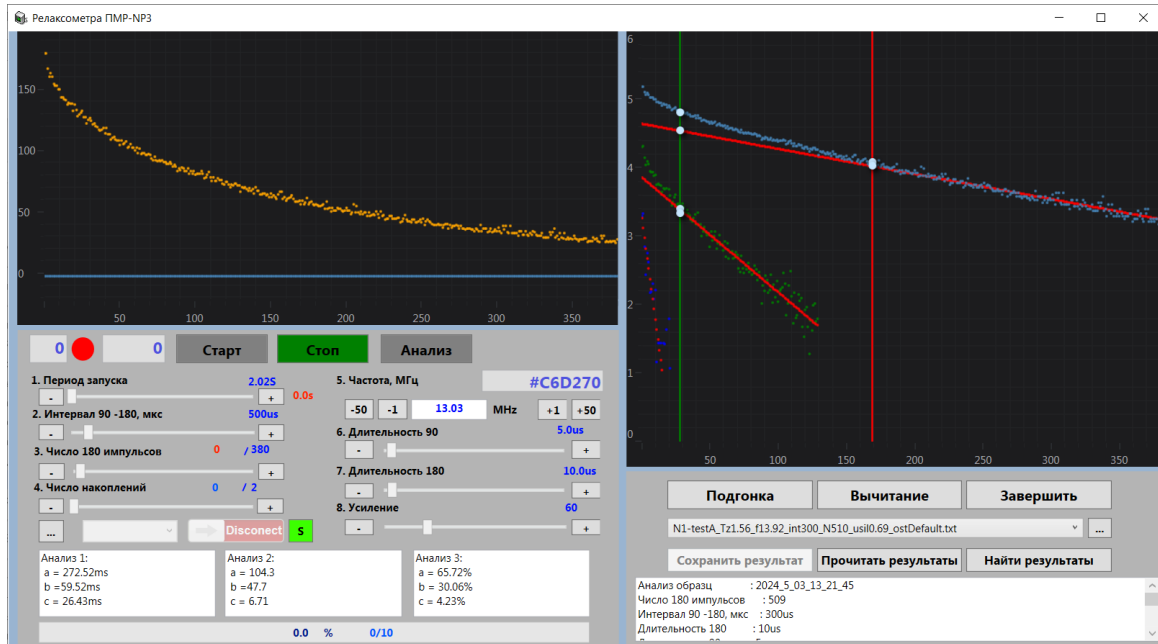
Усилитель мощности выполнен по двухкаскадной схеме, при этом выходной каскад реализован на двух ВЧ *MOSFET*-транзисторах, включённых по двухтактной схеме, что обеспечивает повышение эффективности преобразования энергии и снижение нелинейных искажений. Усилитель мощности питается от источника постоянного напряжения 23,4 В, при этом измеренный ток потребления в рабочем режиме составляет 0,7 А. Импульсы 90° и 180° последовательности КПМГ после усиления в усилителе мощности обеспечивают формирование пикового напряжения ± 150 В на датчике ПМР.

Малошумящий усилитель (МШУ), управляемый напряжением усилитель (УНУ) для приемника релаксометра ПМР, что позволяет усиливать сигнал спин-эха, полученный от датчика ПМР от 1–10 мкВ до 1–1,5 В, соответствующей входу детектора. Коэффициент усиления УНУ можно регулировать до 30 раз. Детектор удаляет ВЧ составляющую в сигнале спин-эха, сохраняя только огибающую сигнала; через встроенный усилитель в операционном усилителе *LM358*, амплитуда сигнала огибающей спинового эха дополнительно усиливается до 3 В, что соответствует входу АЦП-преобразователя. Усилители МШУ и УНУ разработаны на основе интегральных микросхем, согласованных с системным импедансом 50 Ом.

Переключатель П/П в ПМР-релаксометре выполняет функцию защиты приёмника от высокомоощных ВЧ-импульсов передатчика. Переключение работает на основе изменяющихся импедансных характеристик четвертьволновой линии передачи (кабель $\lambda/4$) и нелинейности полупроводниковых диодов. В режиме передачи при подаче высокомоощного ВЧ-импульса обе диодные пары переходят в низкоомное состояние и проводят ток. Кабель $\lambda/4$ обеспечивает формирование высокого эквивалентного импеданса, подключённого параллельно передатчику и датчику, в результате чего практически вся мощность усилителя передатчика передаётся в ПМР-датчик, а приёмник надёжно защищается. В режиме приёма после окончания ВЧ-импульса обе диодные пары остаются в высокоомном состоянии и не проводят ток, поэтому сигнал спин-эхо проходит по приёмному тракту непосредственно к приёмнику. ПМР-датчик релаксометра реализован на основе параллельного резонансного *LC*-контра, который одновременно выполняет функции возбуждения и приёма сигнала спин-эхо, резонансная частота которого равна рабочей частоте ПМР-релаксометра. Добротность (Q) катушки ПМР-датчика поддерживалась на уровне, необходимом для улучшения отношения С/Ш, но не настолько высоким, чтобы сохранить форму высокочастотных импульсов в последовательности импульсов КПМГ. Измерения, выполненные с помощью векторного анализатора цепей, показали, что датчик был точно настроен на резонансную частоту $\nu_0 = 13,036$ МГц, что соответствует добротности катушки $Q \approx 64$. В результате усовершенствований схемотехники разработан новый релаксометр ПМР-*NP3*.

Программное обеспечение настройки и анализа релаксометра ПМР-*NP3* (рис. 6) выполняет функции задания параметров импульсной последовательности КПМГ, таких как: количество 180°-импульсов, интервал между 90°- и 180°-импульсами, длительность 90°- и 180°-импульсов, частота высокочастотного сигнала и др., а также содержит алгоритмы отображения и анализа результатов измерения времени спин-

спиновой релаксации T_2 .



Магниты разработанного релаксометра изготовлены из сплава $NdFeB-N35$. Магнитное поле магнита $NdFeB-N35$ уменьшается с повышением температуры. Это приводит к уменьшению резонансной частоты релаксометра по формуле:

$$\Delta \nu_0 (\text{кГц}) = 13036 (\text{кГц}) - 4,47 \{ t(^{\circ}\text{C}) - 15 \} (\text{кГц} / ^{\circ}\text{C}). \quad (1)$$

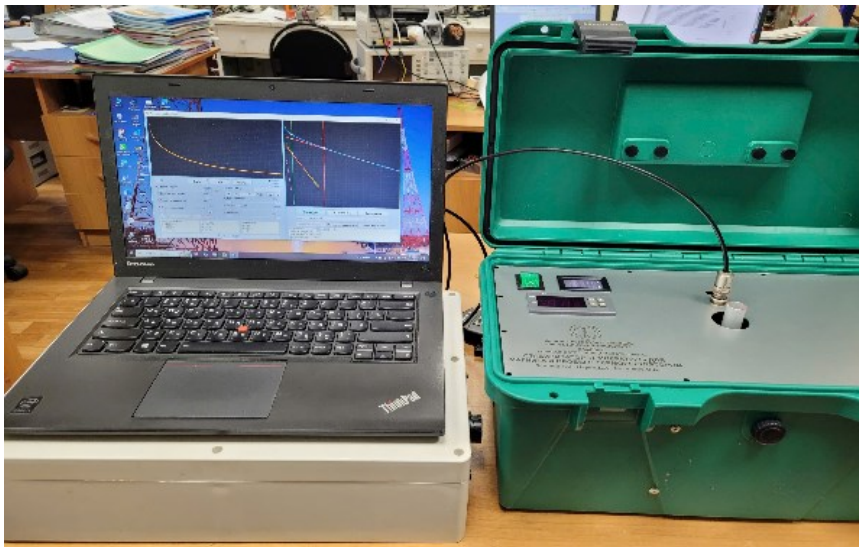


Рис. 7. Термостабилизатор для магнита и образца с терморегулятором

Разработан термостабилизатор, предназначенный для устранения влияния температурных колебаний на магнит и образец (рис. 7). Устройство оснащено термоэлектрическими элементами Пельтье, работающими в режимах нагрева или охлаждения. Терморегулятор обеспечивает задание и регулирование режимов работы модулей Пельтье, что позволяет поддерживать температуру на заданном уровне.

В таблице 1 представлено сравнение основных параметров портативного релаксометра ПМР–NP3 с несколькими лабораторными приборами.

Табл. 1. Технические параметры релаксометра ПМР–NP3 в сравнении с аналогами

Технические параметры	Релаксометр ПМР–NP3п, (2025)	Релаксометр ПМР–NP2п (2019)	Релаксометр ЯМР 08/РС (КБПК, 2007)	<i>Minispec PC 120 (Bruker)</i>
Ошибка измерений времен/ амплитуд, %	3/2	3/2	4/2	3
Чувствительность $K = \nu_0^2 V$, МГц ² ·см ³	2700 – 4150	3608	1344	1600–6400
Резонансная частота ν_0 , МГц	6 – 19	13.92–18.45	5 – 9	10 – 40
Диаметр датчика, мм	10–30	10–30	30	10– 40
Питание:	+24 В, сеть $\approx$ 220 В	+12 В, сеть $\approx$ 220 В	сеть $\approx$ 220 В	сеть $\approx$ 220 В
Потребл. мощность, ВА	16.4	40	60	300
Габариты: электронного блока, см Магнита, см	10x25x30 14x14x15	10x25x30 20x15x10	32x20x39 20x15x10	106x54x43 106x54x43
Масса релаксометра с магнитом, кг	10	16	25	80

В третьей главе описывается разработка системы оперативного мониторинга потока с использованием новых функциональных модулей в составе автоматического анализатора ПМРА–IV, предназначенного для экспресс–контроля физико–химических характеристик сырой нефти и смесей «нефть–вода». Аналог – расходомер *MFMA–5000 (Krohne, Норвегия)*. Функциональная блок–схема усовершенствованного анализатора ПМРА–IV (рис. 8) в отличие от *MFMA* – расходомера, рассчитанного на прямой отбор проб из трубы одного диаметра без обеспечения представительности пробоотбора, ПМРА–IV обладает более широким диапазоном контролируемых параметров нефти. Устройство осуществляет измерение общего расхода и расхода отдельных фаз воды и нефти.

Принцип работы ПМРА–IV, врезанного в трубопровод, следующий. Сырая нефть поступает из трубопровода в емкость 1, в которой за счет перепада давления между трубопроводом и емкостью поток турбулезируется и, как следствие, повышается однородность, т.е. репрезентативность пробы. ПМРА–IV может быть подключён к трубопроводам любого диаметра сменой фланца. Пробоотбор ПМРА–IV реализован подвижным патрубком 2, отбирающим порцию нефти для измерений, а остальная часть потока выносится обратно в трубопровод. Пробоотборный модуль усовершенствован введением платы драйвера управления, точно позиционирующей патрубок, что повышает воспроизводимость и достоверность результатов ПМР–измерений. После отбора пробы скважинная жидкость предварительно намагничивается внутри магнита подмагничивания 3 перед поступлением в измерительный магнит 5. Магнит 3 выполнен в виде магнита Хальбаха длиной около 25 см, состоящего из 20 последовательно сложенных слоев, и формирует магнитное поле с индукцией $B \approx 0,4$ Тл в трубке диаметром 20 мм. Это обеспечивает существенное возрастание амплитуды магнитно-резонансного сигнала, особенно для водной фазы, и повышение отношения С/Ш. Далее поток пробы поступает в измерительную зону ПМР датчика 4, размещенного в зазоре измерительного магнита 5, который представляет собой магнитную систему Хальбаха с индукцией поля $B_0 \approx 0,3068$ Тл с неоднородностью < 260 ppm/см³. Электронный блок усовершенствованного релаксометра 10 регистрирует времена спин-спиновой

релаксации T_{2i} и населенности P_{2i} фаз воды и нефти, по которым определяются скорости v_i потоков i -х фаз и их расходы Q_i по формуле $Q_i = v_i S/t$, где S – сечение трубопровода. При скоростях потока $v = 0,03 - 1$ м/с, диаметре трубы $D = 30$ см, расход составит 0,66–254 м³/час. При большем диаметре расход будет больше. После ПМР-датчика нефть отводится через клапан, автоматически открывающийся в конце измерения и проба сливается в приемную емкость 12, что позволяет выполнять контрольные анализы традиционными лабораторными методами для верификации ПМР-измерений. Приведены возможные области применения ПМРА-IV на цифровом месторождении и экономические аспекты производства. В таблице 2 представлены параметры ПМРА-IV в сравнении с аналогами.

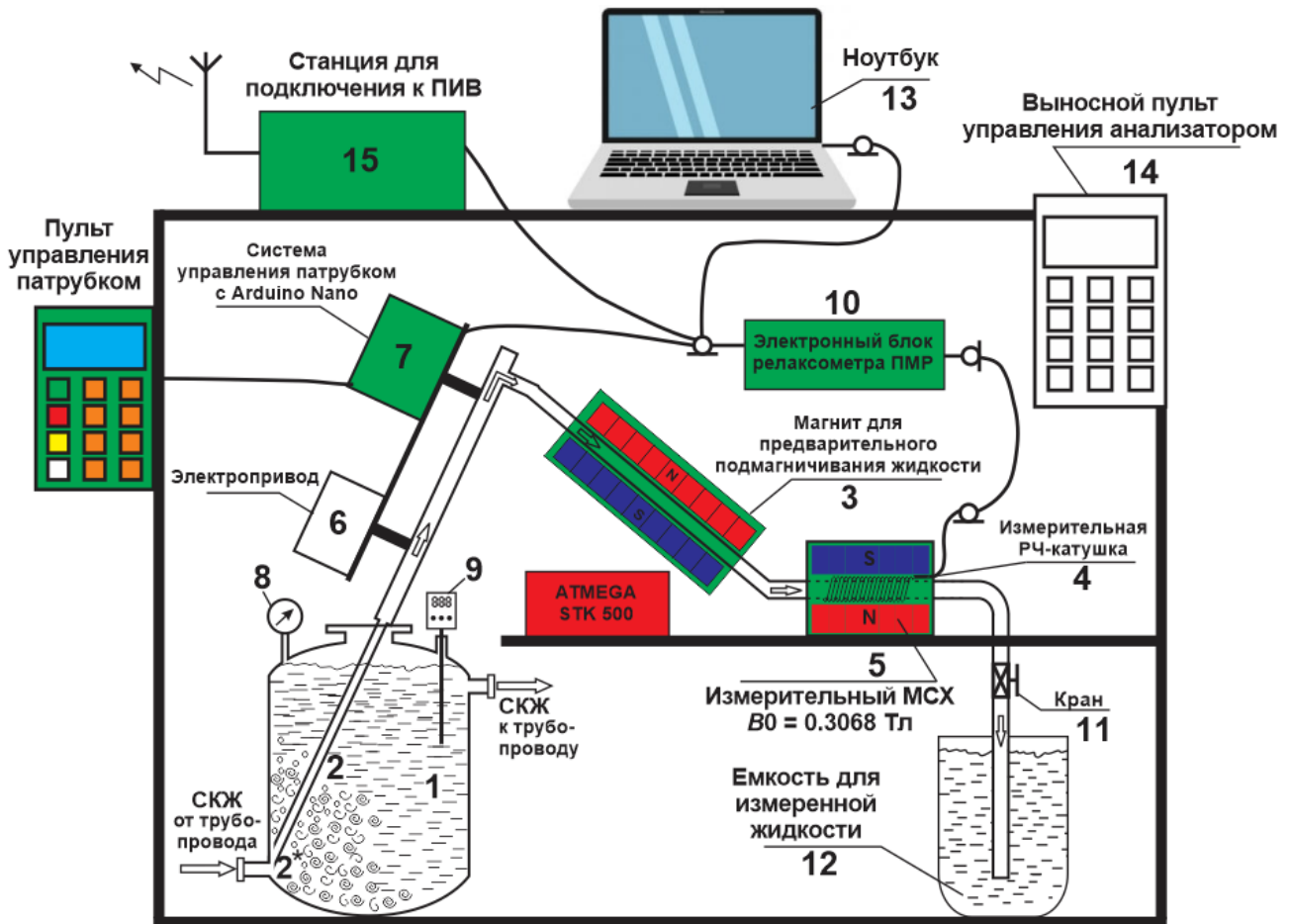


Рис. 8. Функциональная блок-схема усовершенствованного анализатора ПМРА-IV. Зеленый цвет – добавлены или улучшены блоки; красный – удалены блоки

Табл. 2. Характеристики анализатора ПМРА–IV по сравнению с аналогами

№	Наименование комплекса	Диапазоны измерений характеристик нефти	Масса M , кг, габариты L , м, потр. Мощн. P Вт	Ошибки измерения (%)
1	НЕДРА Казань, 1998 г. $v_o = 3,3$ МГц	Расход 1–200 м ³ /ч; Концентрации воды, нефти 0–100%, газа 0–250 %	$M = 350$, $L = 1,6 \times 0,8 \times 0,2$; $0,31 \times 0,43 \times 0,5$, $P = 1500$	$\pm 4,0$, расход; $\pm 4,0$, вода; $\pm 6,0$, газ.
2	MFMA–5000 (Krohne) 2013 г. $v_o = 8–8,5$ МГц	0,64–46,3 м ³ /ч (расход), 0–100 (вода) 0–250 (газ)	$M = 1100–1200$ кг $L = \varnothing 0,9 \times 3,5$ м $P = 180–350$	$\pm 3–5$, расход; $\pm 3–5$, вода $\pm 8–10$, газ

№	Наименование комплекса	Диапазоны измерений характеристик нефти	Масса M , кг, габариты L , м, потр. Мощн. P Вт	Ошибки измерения (%)
3	«ПМРА-IV» КГЭУ, 2022 г. $v_o = 13,04$ МГц	расход (при $v=1$ м/с, $D=0,3$ м) 0,66–254 м ³ /ч; вода, нефть 0–100%; газ 0–250; $\rho = 700–1100$ кг/м ³ ; $\eta = 1,5–350$ мПа·с; дисперсность до 15 μ m Асф до 20 %	$M = 30$, $L = 1,5 \times 1,5 \times 1,0$ $P = 100$	$\pm 2,8$, Расход вода, нефть $\pm 3,85$, газ ± 1 , дисперсность, Асф

В четвертой главе приведена разработка методов экспресс-контроля нефти применением релаксометра в составе ПМРА-IV с учетом особенностей объектов контроля – времён релаксации для нефтей Поволжья, нефтей *Bach Ho* и *Ca Ngu Vang* от концентрации Асф (рис. 9). Определение содержания Асф в нефтях месторождения Поволжья осуществляется по времени T_{2B} фазы B с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,99$. Преобразование формул на рис. 9 дает удобные для использования выражения:

$$\text{Асф} = -2,22 \ln(T_{2B}) + 14,5. \quad (2)$$

Для нефти *Bach Ho* и *Ca Ngu Vang* с $R^2 = 0,995$:

$$\text{Асф} = 11,31 - 0,113 \sqrt{17,7 * T_{2B} - 1244}. \quad (3)$$

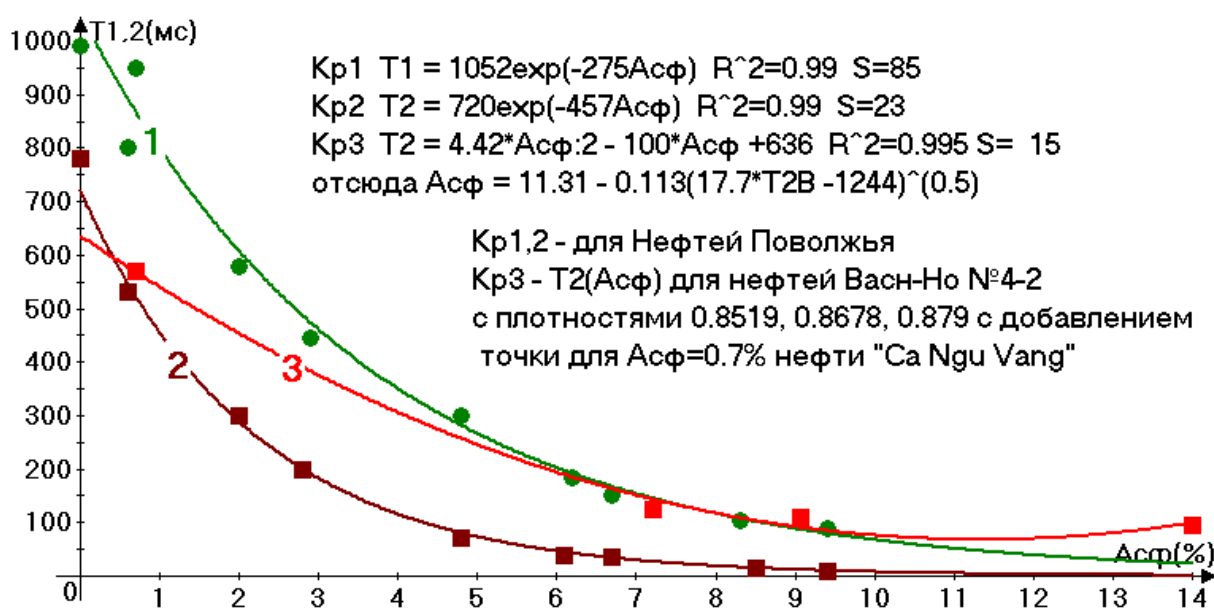


Рис. 9. Зависимость содержания асфальтенов от времени $T_{1,2B}$ (кривая 1,2) для Поволжской нефти; T_{2B} (кривая 3) для нефти месторождения *Bach Ho* и *Ca Ngu Vang* (Вьетнам)

Для прямого определения энергий активации молекулярного движения в фазе температурные зависимости представлены от обратной температуры (по Аррениусу). Времена спин-решеточной T_{1A} (кривая 1 в виде суммы низкотемпературных $T_{1АНТ}$ и высокотемпературных времен $T_{1АВТ}$), спин-спиновой T_{2A} релаксации фазы A , (кривая 2 в виде суммы низкотемпературных $T_{2АНТ}$ и высокотемпературных времен $T_{2АВТ}$), фазы B (кривая 3 T_{2B}) и населенностей протонов $P_{2B} \cdot 10$ этой фазы B (кривая 4), от $10^3/TK$ для нефти *Ca Ngu Vang* представлены на рис. 10. Температурные зависимости T_{1A} и T_{2A} , T_{2B} аппроксимируются уравнениями на рис. 10, из которых видно, что энергии активации молекулярного движения E_A при низких температурах ($E_A = 1650–4073$ кал/моль) в 4–12 раз превышают значения, характерные для

высокотемпературной области ($E_A = 320\text{--}360$ кал/моль), свидетельствуя о существенном ограничении молекулярной подвижности.

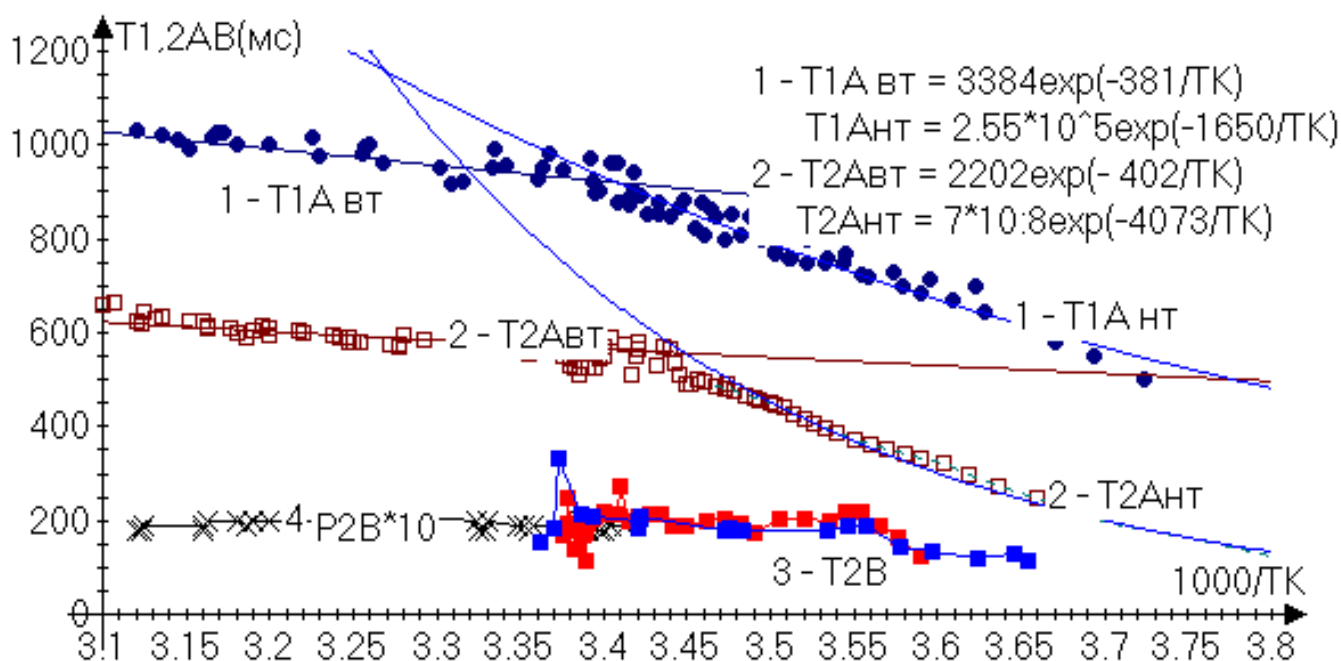


Рис. 10. Температурные зависимости времен T_{1A} (кривая 1 в виде суммы низкотемпературных $T_{1АНТ}$ и высокотемпературных времен $T_{1АВТ}$), $T_{2АВТ}$, $T_{2АНТ}$ (кривая 2), фазы B $T_{2В}$ (кривая 3) и населенностей протонов $10 \cdot P_{2В}$ этой фазы B от $10^3/TK$

Населённости протонов (кривая $10 \cdot P_{2В}$), равные $20 \pm 2\%$, хорошо согласуются с содержанием парафинов в этой нефти. В области $10^3/TK \approx 3,37$ выявлен структурно-динамический фазовый переход, сопровождающийся таянием квазикристаллической гель-структуры и скачкообразным увеличением времен T_2 . При дальнейшем нагревании ($T > 5^\circ\text{C}$) наблюдается естественный рост $T_{2А}$, $T_{2В}$, вызванный молекулярным движением.

Температурные зависимости $T_{1,2}$ газоконденсате *Tien Hai* приведены на рис. 11 и с $R^2 = 0,71\text{--}0,95$ описываются уравнениями:

$$T_{1A} = 0,4684(10^3/TK)^2 - 1529(10^3/TK) + 6606; \quad (4)$$

$$T_{2A} = 139(10^3/TK)^2 - 98,6 \cdot 10^3/TK + 3029. \quad (5)$$

Из кривой 2 на рис. 11 видно, что наклон зависимости минимальный при $10^3/TK < 3,4$, свидетельствуя о минимальных E_A в газоконденсате. Т.е. перекачка газоконденсата оптимальна при температуре $> 21^\circ\text{C}$. В зависимости $T_{1,2А}$ зафиксирован минимум в области температур $-5 \div +3^\circ\text{C}$, при которых произошло таяние кристаллической структуры, видимой невооруженным взглядом. Температурный диапазон $T_{1Аmin}$ совпадает с минимумом T_1 при $10^3/TK = 3,5\text{--}3,7$, обнаруженным в работе Даутова, Христофорова [4]. Авторы отнесли это к вращательным движениям молекул парафинов.

На рис. 12 приведена схема применения ПМРА-IV в промышленном Интернете вещей. Разработано устройство для подключения релаксометра ПМР к веб-серверу промышленного Интернета вещей на ЦМ для интеллектуального мониторинга.

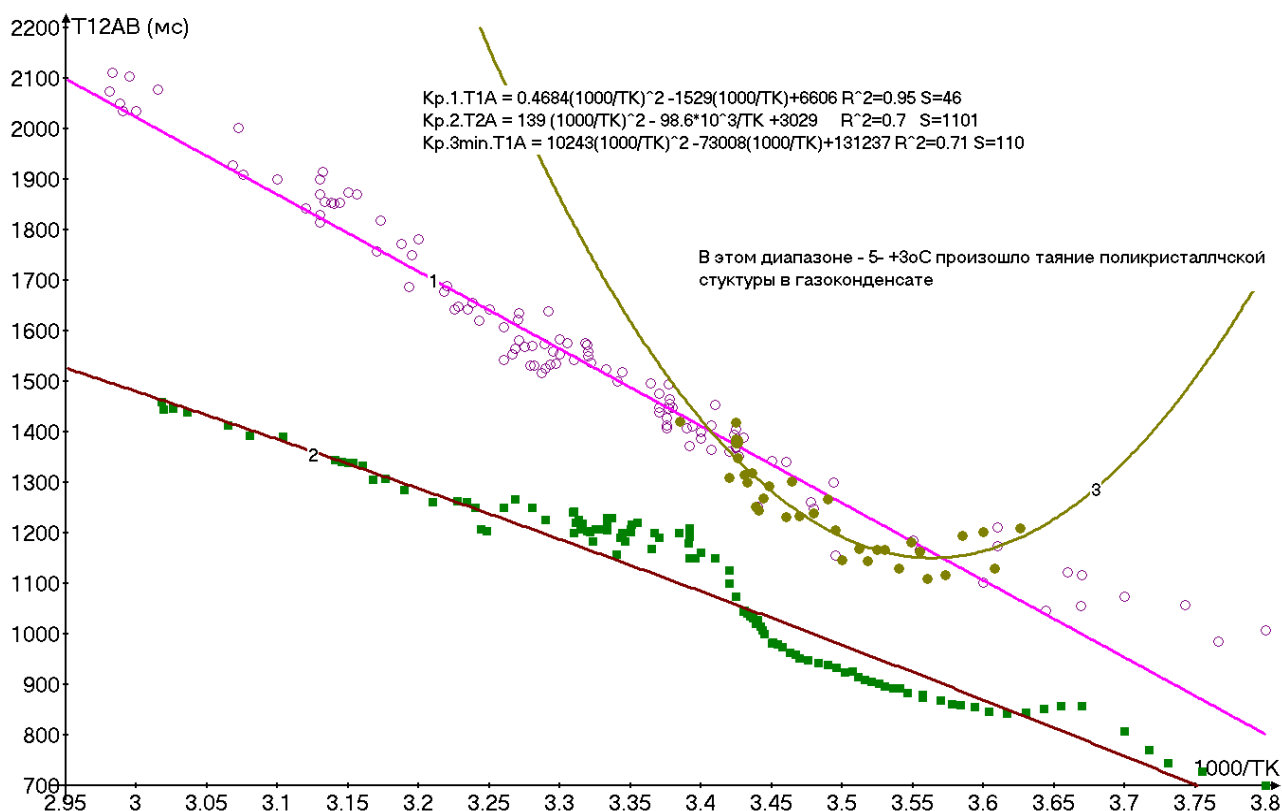


Рис. 11. Температурные зависимости времен релаксации T_{1A} (кривая 1) и T_{2A} (кривая 2), проявление минимума T_{1A} (кривая 3) в газоконденсат *Tien Hai* (Вьетнам)

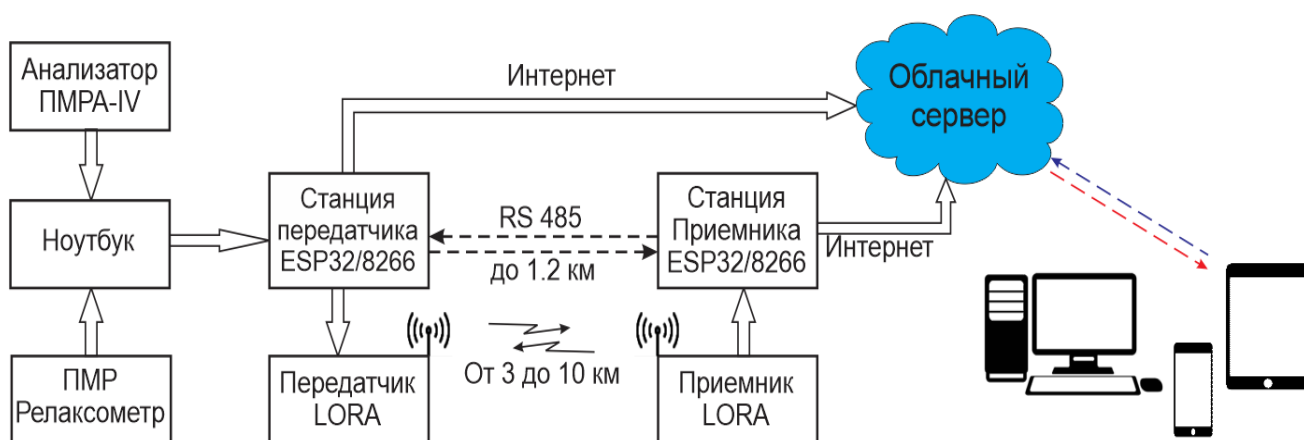


Рис. 12. Мониторинг и контроль выходных параметров нефтяного оборудования анализатором ПМРА-IV в системе промышленного интернета вещей (ПИН)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассчитаны, разработаны и испытаны многослойный магнит Хальбаха для релаксометра ПМР и проточного анализатора ПМРА-IV, обладающий по сравнению с аналогами увеличенным объемом области однородного магнитного поля (до 5,12 см³ при $B_0 = 0,3068$ Тл) при высокой однородности $\Delta B/B_0 = 260$ ppm/см³, а также уменьшенными габаритами и массой. Диаметр рабочего зазора магнита ($d = 30$ мм) позволяет использовать образцы большего объема, что приводит к повышению отношения С/Ш и упрощает интеграцию дополнительных элементов.

2. Разработаны программное обеспечение для управления, сбора и обработки данных, а также новая схемотехника электронных блоков релаксометра ПМР на

основе современной элементной базы, включая: цифровую схему обработки сигналов на базе ПЛИС *ZYNQ-7020*; формирователь импульсных последовательностей на основе прямого цифрового синтеза; полосовой фильтр, предусилитель и усилитель мощности передатчика; малошумящий, управляемый напряжением усилитель, детектор приёмника и ПМР–датчик с переключателем приём/передача.

3. Разработан измеритель индукции магнитного поля с диапазоном измерений 0–1,25 Тл и термостабилизатор для магнита и образца на основе элементов Пельтье с возможностью задания температуры.

4. С учетом усовершенствования блоков релаксометра ПМР-NP3 разработан автоматический проточный анализатор ПМРА-IV четвертого поколения. Преимущества анализатора ПМРА-IV по сравнению с лучшим зарубежным аналогом *MFMA-5000 (Krohne)* включают: более высокую частоту резонанса (в 1,63 раза), более широкую номенклатуру определяемых характеристик нефти, возможность подключения к магистральным трубопроводам любого диаметра, повышение представительности пробоотбора, а также меньшие габариты и массу. Применение предварительного подмагничивания магнитом Хальбаха приводит к увеличению намагниченности водной фазы примерно в 5,3 раза, что сопровождается повышением отношения С/Ш и достоверности измерений.

5. Разработан усовершенствованный проточный модуль пробоотбора с внутренним байпасом и блоком управления пробоотборным патрубком компактного исполнения, интегрированным в корпус модуля, обеспечивающий точное позиционирование пробоотборного патрубка и подачу заданного объёма пробы в ПМР-датчик, что приводит к повышению представительности пробы и достоверности измерений.

6. Исследованы зависимости параметров ПМР–релаксации от концентрации асфальтенов в нефтях *Bach Ho* и *Ca Ngu Vang*, получены соотношения, по которым можно оперативно определять концентрацию асфальтенов и предлагать меры по преотвращению АСПО.

7. Исследованы температурные зависимости времен релаксации в нефти *Ca Ngu Vang*. Сделан вывод, что энергии активации молекулярного движения при низких температурах в 4–12 раз превышают значения, характерные для высокотемпературной области, что свидетельствует о формировании упорядоченных структур. Населённость протонов P_{2B} фазы составляет $\approx 20 \pm 2\%$, что хорошо согласуется с содержанием парафинов. Полученные результаты подтверждают перспективность ПМР–анализа для оценки реологических свойств нефти.

8. В температурной зависимости $T_{1A,B}$ газоконденсата зафиксирован минимум при температурах $-5 \div +3^\circ\text{C}$, при котором происходит таяние поликристаллической структуры, видимой оптически. В области $10^3/T_K \approx 3,37$ выявлен фазовый переход, сопровождающийся таянием квазикристаллической гель-структуры и скачкообразным увеличением времен T_2 . При дальнейшем нагревании ($T > 5^\circ\text{C}$) наблюдается рост T_{2A} и T_{2B} , обусловленный усилением молекулярного движения.

9. Предложены и обоснованы области применения анализатора ПМРА-IV на цифровом нефтегазовом месторождении, а также разработано устройство для подключения релаксометра ПМР к веб–серверу промышленного Интернета вещей.

Тема диссертационного исследования имеет значительные перспективы дальнейшего развития, связанные с совершенствованием методов и средств автоматизированного проточного ПМР–контроля характеристик нефти, газоконденсата и пластовых жидкостей скважин в условиях цифровых

месторождений.

Перспективным направлением является создание распределённой сети интеллектуальных приборно-программных комплексов для непрерывного мониторинга параметров добываемых углеводородных сред в режиме реального времени с использованием технологий промышленного Интернета вещей, облачных платформ и цифровых систем управления нефтегазодобычей. Дальнейшее развитие темы связано с расширением функциональных возможностей анализатора ПМРА-IV, повышением точности и устойчивости измерений в условиях сложных многофазных потоков, а также совершенствованием алгоритмов цифровой обработки и интерпретации ПМР-сигналов.

Практический интерес представляет адаптация разработанных технических решений для эксплуатации на морских нефтегазовых месторождениях Вьетнама, характеризующихся большим количеством удалённых скважин в пределах единой производственной инфраструктуры. Внедрение автоматизированных ПМР-систем контроля может обеспечить повышение эффективности мониторинга технологических процессов, получение оперативной информации о состоянии пластов и остаточных запасах углеводородов, снижение эксплуатационных затрат и повышение экономической эффективности нефтедобычи.

Дальнейшее развитие исследований также может быть связано с интеграцией ПМР-анализаторов в интеллектуальные системы поддержки принятия решений, цифровые двойники месторождений и автоматизированные комплексы управления добычей нефти и газа.

СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тихомирнов Л. И. Цифровизация: ключевые факторы успеха // Нефтегаз. 2019. № 1–2. С. 142–143.
2. Safieva R. Z., Mishin V. D. Systems analysis of the evolution of views on oil systems: from petroleum chemistry to petroinformatics // Petrol.Chem. 2021. Vol. 61. P. 539–554.
3. Hogendoorn J., Boer A., Appel M., de Jong H., de Leeuw R. Magnetic Resonance Technology: a new concept for multiphase flow measurement // 31st International North Sea Flow Measurement Workshop (Tønsberg, Norway, 22–25 Oct. 2013). P. 25.
4. Христофоров А.В., Даутов Р.А. Особенности динамики молекул в парафинах в состоянии предплавления// Матер. II Всесоюзного совещания, 1994. Йошкар–Ола, с. 136

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи автора в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus

A1. Kashaev R., Anh N.D, Kozelkova V., Kozelkov O., Dudkin V. Online Multiphase Flow Measurement of Crude Oil Properties Using Nuclear (Proton) Magnetic Resonance Automated Measurement Complex for Energy Safety at Smart Oil Deposits // Energies. 2023. Vol. 16. No. 3. P. 1080. DOI 10.3390/en16031080 (МБД SCOPUS Q2, приравнено к публикации ВАК K1)

A2. Kashaev R.S., Kozelkova V. O., Anh N.D., Kozelkov O.V. Application of a Portable Proton NMR Flow Analyzer for Rapid Monitoring of Petroleum Product Properties and Water Contamination // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2025. Vol. 59. No. 2. P. 463–470. DOI 10.1134/S0040579525700721 (МБД SCOPUS Q4,

приравнено к публикации ВАК К2)

A3. Tran Van Tung, Kashaev Rustem Sultankhamitovich, Nguyen Duc Anh. Research on the application of IoT solution for rapid control of oil parameters in smart oil fields based on proton magnetic resonance method. 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2025, pp. 518–523. doi: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028468. (МБД SCOPUS)

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации

A4. Кашаев Р.С., Нгуен Дык Ань, Козелков О.В. Проточный экспресс-анализатор проточного магнитного резонанса в составе промышленного Интернета вещей // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2024. Т. 67. № 5. С. 425–434. DOI 10.17586/0021–3454–2024–67–5–425–434 (ВАК К1)

A5. Нгуен Д.А., Кашаев Р.С., Козелков О.В., Арсланов А.Д., Чан В.Т. Разработка усовершенствованного программно-аппаратного комплекса управления патрубком анализатора протонного магнитного резонанса ПМРА-IV // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27. № 1. С. 3–15. DOI 10.30724/1998–9903–2025–27–1–3–15 (ВАК К2)

A6. Арсланов А.Д., Нгуен Д.А., Кашаев Р.С., Козелков О.В., Чан В.Т. Анализатор нефти ПМРА-IV для автоматизированного контроля характеристик исследуемых образцов // Автоматизация в промышленности. 2025. № 1. С. 50–53 (ВАК К2).

A7. Нгуен Д. А., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Разработка многослойных усовершенствованных магнитных сборок Хальбаха для ПМР-релаксометра на основе оптимизации параметров магнита // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27. № 2. С. 20–32. DOI 10.30724/1998–9903–2025–27–2–20–32. (ВАК К2).

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

A8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615694 Российская Федерация. Программа визуализации зависимостей характеристик нефти от параметров протонной магнитной резонансной релаксометрии для системы контроля проточного ПМР-анализатора: № 2024613804; заявл. 27.02.2024; опубл. 12.03.2024 / Арсланов А.Д., Кашаев Р.С., Козелков О.В., Нгуен Д.А., Галиев А.Б.; заявитель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

A9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682954 Российская Федерация. Программа автоматизированного контроля и обработки сигналов при исследованиях характеристик нефти методом протонной магнитно-резонансной релаксометрии для системы экспресс контроля проточного ПМР-анализатора: № 2024681562; заявл. 19.09.2024; опубл. 01.10.2024 / Арсланов А.Д., Кашаев Р.С., Козелков О.В., Нгуен Д.А., Галиев А.Б.; заявитель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

A10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025667277 Российская Федерация. Система дистанционного мониторинга и контроля параметров образцов на основе ПМР-релаксометра и IoT: заявл. 10.06.2025; опубл. 03.07.2025 / Нгуен Д.А., Кашаев Р.С., Динь. Т.Н., Чан В.Т.; заявитель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Патенты на изобретения

A11. Патент № 2808801 С1 Российская Федерация, МПК H01F 7/00, H01F 10/12, H01F 10/26. Магнит : № 2023105051 : заявл. 06.03.2023 : опубл. 05.12.2023 / Кашаев Р.С., Нгуен Д.А.; заявитель ФГБОУ ВО "Казанский государственный энергетический университет".

A12. Патент № 2813962 С1 Российская Федерация, МПК G01N 24/08. Способ и устройство для определения скоростей потока (расхода) и концентрации воды в водо–нефтяных смесях : № 2023105685 : заявл. 13.03.2023 : опубл. 20.02.2024 / Кашаев Р.С., Нгуен Д.А., Козелков О.В.; заявитель ФГБОУ ВО "Казанский государственный энергетический университет".

A13. Патент № 2860172 С1 Российская Федерация, МПК F25B 29/00, F28D 1/00. Стабилизатор температуры для магнита и образцов с терморегулятором: № 2025107576 : заявл. 28.03.2025 : опубл. 14.04.2026 / Кашаев Р.С., Нгуен Д.А., Козелков О.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Публикации в прочих рецензируемых научных изданиях

A14. Кашаев Р.С., Нгуен Дык Ань, Козелков О.В. Мехатронный проточный анализатор жидкости на базе метода протонного магнитного резонанса // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2023. – № 11. – С. 176–179. – DOI 10.26160/2541–8637–2023–11–176–179.

A15. Nguyen Duc Anh, Kashaev R.S., Tran Van Tung. Research and development of equipment to determine the parameters of crude oil on the basis of application nuclear magnetic resonance method // HaUI Journal of Science and Technology. 2024. Vol. 60. No. 9. pp. 199–205. DOI: 10.57001/huih 5804.2024.316.

A16. Нгуен Дык Ань, Нгуен Вьет Тьеп, Нго Кьен Динь. Разработка термостабилизатора для магнита и образца с терморегулятором ядерно–магнитного резонансного релаксометра // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2025. № 47. С. 77–82. <https://doi.org/10.26160/2474–5901–2025–47–77–82>.

Подписано в печать 19.06.2026. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100. Заказ № 2506/2.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: +7(843)292-98-92
e-mail: westfalika@inbox.ru
