

Краткое изложение содержания работы.

В настоящее время российская экономика переходит на инновационный, цифровой путь развития. Распоряжение правительства Российской Федерации №1632 о «создании экосистемы цифровой экономики на базовых направлениях: новые производственные технологии и компоненты робототехники», актуализирует создание интеллектуального цифрового месторождения (ЦМ) объектов нефтедобычи, подготовки сырья и экологического мониторинга среды. ЦМ дают прирост добычи нефти на 10-25%, снижают энергетические потери на 8% и позволяют перейти к новой стадии эксплуатации старых месторождений, на которых увеличивается добыча тяжелой, высокообводненной с концентрацией воды >95% нефти (до 66 % по России). В то же время вязкие нефти являются потенциалом нефтедобычи, и Энергетической стратегией России до 2035 г. предусмотрено «создание инновационной системы энергетики с отечественными технологиями для энергетической безопасности страны, добычи тяжелой и высокообводненной нефти без иностранных технологий». С связи с этим стала актуальной проблема разработки инструментального оперативного средства и методик измерений для цифрового месторождения, а также отдаленных локаций и морских платформ.

Базовой основой ЦМ являются сбор данных с их анализом и управлением событиями, затрудненный многообразием входящих в нефть компонентов, их меняющимися за короткое время свойствами в широких диапазонах, агрессивностью и взрывоопасностью среды. Поэтому важно обеспечить ЦМ роботизированными проточными экспресс-анализаторами физико-химических свойств (ФХС) жидкостей, в том числе нефти, скважинной жидкости (СКЖ) и нефтепродуктов, причем с более высокими, чем у существующих анализаторов метрологическими параметрами и с

возможностями их встраивания в системы автоматизации промышленных технологий на ЦМ. Необходимо было снизить погрешности анализа, которые достигают 15% при измерениях характеристик нефти и 30% при пробоотборе, расширить диапазон измерений, например, обводненности (до 100%), вязкости, асфальтено-смола, серы, молекулярной массы до максимальных значений в трудноизвлекаемых запасах.

Основная научно-техническая идея.

Уникальные возможности для роботизированного проточного экспресс-контроля, анализа и управления технологическими процессами предоставляет неконтактный, неразрушающий многопараметрический метод ядерного (протонного) магнитного резонанса (ПМР), позволяющий в одном анализаторе без движущихся деталей и без сопротивления потоку, осуществлять on-line-контроль методом ПМР-релаксометрии (ПМРР) на потоке характеристик СКЖ и нефти по ряду ПМР-параметров – временам и скоростям спиновой релаксации, амплитудам сигналов и населенностям протонов. Возможности ПМР связаны с квантово-механическими свойствами протонов, коррелирующими с характеристиками нефти и компонентов. ПМР может быть использован: при контроле и анализе качества нефти, структуры и динамики молекул, измерении скоростей потоков и их распределения, а также для получения данных о фазовых переходах и процессах структурно-динамического упорядочения в нефти. В используемом в методе ПМРР пробоподготовка практически отсутствует, методические ошибки минимизируются градуировками по стандартным и охарактеризованным в лабораториях образцам, при обработке данных с аппроксимацией кривых с высокими коэффициентами корреляций. Представительность пробоотбора жидкости осуществляется в режиме байпаса путем предварительной гомогенизации многофазной жидкости (напр. нефте-водно-газовой скважинной жидкости - СКЖ)

в измерительной емкости под действием перепада давления (при резком изменении сечения трубы).

Описание результатов и их значение для практики.

Впервые автором разработана основа многопараметрического проточного анализа жидкостей, позволяющая альтернативно по нескольким параметрам ПМР верифицировать данные. Впервые автором разработаны методики экспресс-контроля на потоке характеристик нефти методом ПМР-релаксометрии (ПМРР). В разработанном экспресс-анализаторе ПМРА-IV четвертого поколения представительность пробоотбора достигается предварительной гомогенизацией пробы без сопротивления потоку, чувствительность повышена предварительным подмагничиванием пробы.

В состав разработанного роботизированного проточного экспресс-анализатора входит релаксометр ПМР-NP2п, выполняющий функцию контрольно-управляющего блока анализатора ПМРА-IV. Он явился результатом многолетней (с 1991 г.) работы над релаксометрами ЯМР в качестве научного руководителя и директора «КБ резонансных комплексов» (КБРК) по изготовлению лабораторных и портативных автономных (с питанием от аккумулятора) релаксометров ПМР. Изготовлено больше 50 экземпляров с общим экономическим эффектом свыше 45 млн. руб.

Лабораторные релаксометры ЯМР-РС 01-09 в 9 вариантах изготавливались по ТУ 25-4823764.0031-90 в КБ РК, внедрены в организациях и вузах: ПАО «Татнефть», Якутском и Усинском нефтегазодобывающих управлениях, Институте «ТаниПИнефть», трех заводах АО «Таткрахмалпатока», Казанском Моторно-производственном объединении, Дрогобычском НПЗ (Украина); Российском госуниверситете нефти и газа им. И.М.Губкина (каф. Физики

проф. Сюняев Р.З., Москва), Казанском технологическом, энергетическом и Ижевском госуниверситете, Иллинойском Университете (EPR Reserch Centre, Чикаго, США).

Разработанный портативный Релаксометр ПМР-МР1 не имеет мировых аналогов, включен в число новейших технологий и удостоен Национального сертификата качества и участвовал в саммите РТ в Лондоне (2006).

Портативные релаксометры приобретены и используется в учебных процессах Пермского, Казанского, Краснодарского и Екатеринбургского госуниверситетов. Конструкция, схемотехника и принцип работы релаксометров ПМР-МР1,2 защищены патентами: № 67719; № 2319138; № 134698; 136143; №137355.

Автором - научным руководителем в составе коллектива КБРК и Казанского НИИ радиотехнологии (КНИРТИ) по КД ПИАВ 423.314.002 разработаны методики измерения и схемотехника взрывозащищенного проточного ЯМР-анализатора скважинной жидкости «Недра». В 1999 г. анализатор прошел испытания в ПАО «Татнефть». Впоследствии анализатор под маркой «Недра-40» был сертифицирован и серийно выпускался на з-де «Радиоприбор», Казань.

В последующие годы был разработан ПМР-анализатор второго поколения ПМРА-II, защищенный патентами РФ №74710, удостоенный золотой медали VII Московского международного салона инноваций и инвестиций (2007 г.). На его базе предложены защищенные патентами: Способ оперативного контроля серосодержащих соединений в нефти и нефтепродуктах, №2359260, Способ и устройство оперативного контроля компонентов и органических соединений в их смесях, № 2411508, Устройство для обезвоживания и обессоливания водонефтяных и водомасляных эмульсий № 115679. На базе ПМРА-III третьего поколения, защищенного в 2013 году патентом № 138791, предложены: Способ оперативного контроля качества

нефти и нефтепродуктов №2519496 и Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентных жидкостей методом ЯМР патент №2544360.

В 2022 году автор проекта как научный руководитель группы разработал роботизированный проточный экспресс-анализатор ПМРА-IV четвертого поколения. В отличие от отечественного аналога – проточного расходомера-влажгомера «НЕДРА-40» (КНИРТИ, Казань) и лучшего зарубежного многофазного анализатора характеристик потока сквжинной жидкости фирмы MFMA (Krohne, 2013 г) ПМРА-IV имеет: более широкую номенклатуру измеряемых характеристик; возможность измерения скоростей u_i (и соответственно расходов) компонент водо-газо-нефтяных потоков в трубах любого диаметра (методик-аналогов нет); экспресс-контроля концентраций воды, нефти, газа, серы, асфальтено-смола и парафинов (проточных методик-аналогов нет); плотности, вязкости, (проточных методик-аналогов нет), молекулярной массы (проточных анализаторов и методик-аналогов нет), дисперсного распределения капель воды в водо-нефтяных и водо-масляных эмульсиях (проточных анализаторов и методик-аналогов нет), температур застывания нефти и нефтепродуктов (проточных анализаторов и методик-аналогов нет); концентрации солей металлов и нефти в сточных водах. Анализатор ПМРА-IV имеет более высокую точность измерений, на порядок меньший вес, габариты, потребляемую мощность и цену. ПМР-анализатор исключает сепараторы газа, воды и нефти, может единым прибором заменить систему измерения качества нефти (СИКН) и анализаторов практически всех характеристик нефти на общую сумму 30 млн. руб.

Технологии проточного контроля нефти методом протонной магнитной резонансной релаксометрии позволяют обеспечить измерения характеристик:

- скоростей потоков и расхода в диапазоне $Q = 0.66 \div 475 \text{ м}^3/\text{сут}$ с ошибкой $\Delta = 3\%$;

- концентраций воды W в диапазоне 0-100%, с ошибкой $\Delta = 0.98\%$;
 - газонасыщенности скважинной жидкости в диапазоне с ошибкой $\Delta = 3\%$;
 - дисперсного распределения капель в диапазоне $0 \div 20$ мкм, с ошибкой ± 0.5 мкм;
 - плотности ρ_n нефти в диапазоне 700–1100 кг/м³ с ошибкой $\Delta\rho/\rho_{\max} = 0.98\%$;
 - кинематической ν вязкости в диапазоне 0–350 мм²/с $\Delta = 1.2\%$;
 - концентрации солей в воде в диапазоне 0–10 мг/л с ошибкой $\Delta = 0,2$ мг/л)
 - асфальтено-смола в нефти в диапазоне $AC = 0-15\%$ с ошибкой $\Delta = 0.44\%$;
 - серы в нефти в диапазоне 0-15% с ошибкой $\Delta = 1.4\%$;
 - средней молекулярной массы нефти в диапазоне $MM = 50-1000$ аеи $\Delta \approx 2.1\%$
 - температур застывания дизельного топлива в диапазоне температур $T_3 = -70 \div -40^\circ\text{C}$ и высокопарафинистой нефти в диапазоне $T_3 = -16 \div +56^\circ\text{C}$ с абс. $\delta_A \approx 2.8$
- Во всех случаях время экспресс-контроля анализатором в 3-10 раз меньше.

Характеристики ПМРА-IV по сравнению с аналогами

Таблица 1

№	Наименование анализатора	Диапазон измерений характеристик НДС (%)	Масса M , кг, габариты L , м, потр. Мощн. P Вт	Ошибка (%)
1	“НЕДРА-40”, Казань, 3-д «Радиоприбор»	Расход 1-200 м ³ /ч; Концентрации воды, нефти 0-100%, газа 0- 250	$P = 1500$, $M = 350$, $L = 1.6 \times 0.8 \times 0.2$; $0.31 \times 0.43 \times 0.5$	± 4 , расход ± 4 , вода, нефть; ± 4 газ
2	MFMA (Krohne) 2013 г.	0,64-46,3 м ³ /ч (расход), 0-100 (вода) 0-250 (газ)	$P = 2000$ (оценка) $M = 700$ (оценка) $L = \varnothing 0.3 \times 3$ м	0.5-1.0, расход; 0.5-1.0, вода 0.5-1.0, gas
3	“ПМРА-IV” ФГБОУ ВО Казанский государственный энергетический университет, 2022.	0.66-475 м ³ /ч (расход); 0-100(вола, нефть; 0-250 газ; 700-1100 кг/м ³ плотность; 1.5-350 мПа·с вязкость; 0–15μм, ДРК 0-15мкм; АСП	$P = 300$ $M = 200$, $L = 1.5 \times 1.5 \times 1.0$	Расход ± 2.8 вода, нефть - ± 3.85 , газ ± 1 , плотность, вязкость, ДРК, АСП

Объемы внедрения.

Внедрение аппаратуры и метода ядерного (протонного) магнитного резонанса (ПМР) началось с лабораторных релаксометров ЯМР-02-09РС и контрольно-управляющего блока ПМРА-IV - портативного релаксометра ПМР-NP1,2. Оно осуществлено в вузах и организациях Российской Федерации методик измерения всей номенклатуры характеристик СКЖ и нефти.

Методики измерения, реализованные на опытных образцах анализатора ПМРА-IV внедрены в АО «Меллянефть», Казанском авиационном заводе им. С.П.Горбунова, филиале ПАО «Туполев», на кафедре приборостроения и мехатроники ФГБОУ ВО «КГЭУ» и используются в учебном процессе. Апробация ПМРА-IV производилась на образцах нефтей в АО «Транснефть-Прикамье» и ООО «Роснефть-Краснодарнефтегаз». Получены акты внедрения и положительные отзывы.

Технологические процессы, используемые в ПАО «Татнефть» защищены патентами: №1333364 Способ обезвоживания водонефтяных и водомасляных эмульсий и устройство его осуществления; №2135986 Способ определения температуры размягчения тяжелых нефтепродуктов; № 2411508 Способ и устройство оперативного контроля органических соединений в смесях; №2519496, 2012 Способ оперативного контроля качества нефти и нефтепродуктов.

Предложены и запатентованы установки, используемые для добычи и подготовки нефти патентами РФ: № 2411508, № 73486, 2012 Устройство для удаления серы из топлив, нефти и природных битумов, управляемое от релаксометра ЯМР; № 74710 Устройство для измерения состава и расхода много-компонентных жидкостей методом ЯМР; № 115679 Устройство для обезвоживания и обессоливания водонефтяных и водомасляных эмульсий; №136160 Устройство для измерения температур фазового перехода; №2544360 Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентных

жидкостей методом ЯМР; №2681738 Система оптимизации работы группы нефтегазовых скважин; №198224 Устройство для обезвоживания водонефтяных эмульсий; №2808801 Магнит; №2689103 Многофункциональная автоматическая цифровая интеллектуальная скважина (МАЦИС) управляемая от анализатора ПМРА-IV по данным экспресс-контроля ПМР-параметров. Данный патент получил Диплом как один из 100 лучших патентов России за 2019-2020 гг.

Методики измерения реализованы и на автономном переносном блоке ПМРА-IV – портативном релаксметре ПМР-NP1,2. Методики внедрены в АО «Меллянефть»; Казанском авиационном заводе им. С.П.Горбунова, филиале ПАО «Туполев»; на кафедре Приборостроения и мехатроники ФГБОУ ВО «КГЭУ» и используются в учебном процессе. Апробация прибора производилась на образцах нефтей в АО «Транснефть-Прикамье» ООО «Роснефть-Краснодарнефтегаз».

По теме проекта опубликовано: 146 научных работ (всего 417), в том числе в журналах K1, Scopus и WoS – 45, ВАК- 45, Монографий – 12, патентов – 34.

Достигнутый экономический и (или) социальный эффект от внедрения.

Основной управляющий блок ПМРА-IV – релаксметр ПМР внедрен в ряде организаций и вузов Российской Федерации. Общий экономический эффект от внедрений составил более 45 млн. руб. Экономический эффект от внедрения анализатора ПМРА-IV оценен в 2,3 млн. руб/год (на 2022 г.), а эффект от отдельного применения релаксометра ПМР-NP1,2 составляет 1.2 млн.руб/год (оценка на 2007 г). Анализатор может заменить приборы для всех анализируемых характеристик на нефтепромыслах на общую сумму 30 млн. руб. Эффект заключается в автоматизации процессов экспресс-контроля добываемой, подготавливаемой и перекачиваемой нефти, в снижении

«человеческого фактора» в технологических процессах, и следовательно в предотвращении аварий, в возможности мануального контроля по технологической цепочке и в стационарном и ручном мониторинге загрязненности окружающей среды - воды и почвы солями тяжелых металлов и нефтями/нефтепродуктами. Социальный эффект разработки определяется возможностью использования проточного экспресс-анализатора ПМРА-IV, портативных релаксометров ПМР-NP1,2, предложенных методов, и стендов в образовательной деятельности вузов, что обеспечивает цифровой уровень методического и роботизированного (мехатронного) оснащения учебного процесса.

Разработчики анализатор ПМРА-IV и Казанский государственный энергетический университет в 2023 г стали лауреатами Премии 4.0 «Первооткрыватель года – Инновационное решение, примененное впервые» от Цифровой индустриальной платформы. Реализация ПМРА-IV на ЦМ позволит обеспечить импортозамещающим отечественным оборудованием, стимулировать отечественного производителя в сложных отраслях промышленности.