

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

УШАКОВ Антон Валерьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СКВАЖИН
ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫМИ НАСОСАМИ МЕТОДОМ
ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ НА ДОБЫВАЕМЫЙ
ФЛЮИД**

Специальности 25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных и
газовых месторождений

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:
доктор физико-математических наук
профессор Коровкин М.В.

Томск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1 МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ОСЛОЖНЁННЫХ УСЛОВИЯХ.....	11
1.1 Общие представления о видах и характере осложнений нефтедобычи	12
1.2 Анализ последствий воздействия осложнений на электроцентробежные насосы.....	19
1.2.1 Общие подходы при описании воздействий осложнений на электроцентробежные насосы.....	19
1.2.2 Методология сложных систем и теории вероятностей при исследовании надёжности работы УЭЦН.....	27
1.3 Принципы управления эффективностью работы электроцентробежных насосов при эксплуатации в осложнённых условиях	30
1.4 Формирование целей и задач диссертационной работы	35
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1	35
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПОСЫЛОК, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ НЕФТИ. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .	37
2.1 Анализ теоретических предпосылок и экспериментальных исследований применения магнитной обработки для воздействия на нефти	37
2.2 Анализ аппаратуры магнитного воздействия на нефти	51
2.3 Характеристика объекта и постановка задачи экспериментальных исследований.....	58
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2	62
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОНФ-СИСТЕМЫ.....	63
3.1 Принципы методологии и выбор аппаратурных решений лабораторных испытаний ОНФ-систем в условиях воздействия магнитного поля	63
3.2 Методы лабораторных исследований ОНФ - систем.....	74
3.2.1 Методология приготовления и отбора образцов для исследования	74
3.2.2 Солеотложения	75
3.2.3 Пескопроявления (дисперсная минеральная фаза)	84
3.2.4 Парафиноотложения	97

3.3 Анализ результатов экспериментальных исследований и уточнение задачи построения физико-механических принципов формирования структурообразования в ОНФ - системе при магнитной обработке	101
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3	102
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ОНФ-СИСТЕМАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ.....	105
4. 1 Исследование принципов и формирование предпосылок генерации дисперсной минеральной фазы (ДМФ)	106
4.1.1 Агломераты и зерна - основные элементы дисперсной минеральной фазы	107
4.1.2 Трёхуровневый метод определения средних диаметров частиц: среднечисленный, среднеповерхностный и среднемассовый диаметр.....	110
4.2 Физико - механическая модель песчаника.....	115
4.3 Исследование принципов и формирование предпосылок процесса структурообразования солеотложения при магнитном воздействии	125
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4	131
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МЕТОДОВ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ДОБЫВАЕМОГО ФЛЮИДА НА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ	132
5.1 Обоснование выбора магнитотвердых материалов - источника магнитного поля для использования в компоновке с УЭЦН	132
5.2 Разработка конструктивных особенностей эффективного применения источника магнитного воздействия в компоновке с УЭЦН	136
5.2.1 Анализ применяемых технологических решений по воздействию магнитным полем в компоновке с УЭЦН	136
5.2.2 Разработка технологических решений для повышения эффективности воздействия магнитным полем в компоновке с УЭЦН	138
5.3 Рекомендации по повышению эффективности эксплуатации УЭЦН	142
5.4 Определение экономически целесообразных показателей эффективности эксплуатации УЭЦН.....	145
5.5 Дорожная карта промышленной апробации технологии магнитного воздействия	151
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 5	153
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	155
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	159
ПРИЛОЖЕНИЯ	172

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Современное состояние нефтегазодобывающей отрасли обусловлено ухудшением качества ресурсной базы, увеличением доли трудноизвлекаемых запасов в структуре активов нефтяных компаний и, как следствие, осложнением условий эксплуатации оборудования. Структура остаточных запасов нефти резко ухудшается из-за выборочной разработки лучшей части запасов, особенно для крупных (запасы более 30 млн. т) месторождений, обеспечивающих 2/3 добычи нефти в стране. В настоящий момент, в виду сложившейся ценовой конъюнктуры на мировом рынке нефти, весьма актуальным становится вопрос снижения эксплуатационных затрат на добычу углеводородного сырья.

Имеющиеся предпосылки диктуют нефтегазодобывающим компаниям условия для формирования основных стратегий их дальнейшего развития. Основополагающей стратегией является снижение удельных затрат на добычу 1 тонны нефти на 5-10% в течение ближайших лет. Как показывает мировая нефтегазопромысловая практика, приблизительно 20% скважин, эксплуатирующихся механизированным способом добычи, оборудованы установками электроцентробежных насосов (УЭЦН), что составляет в количественном выражении около 180 тыс. скважин.

Основное отрицательное влияние на технико-экономические показатели работы скважины оборудованной УЭЦН оказывает геологическая группа осложнений, а именно: свободный газ, связанная вода, отложения солей и парафинов, пескопроявление - механические примеси. Природа и особенности данных осложнений формируются в результате образования нефтегазовой залежи и активно проявляются при взаимодействии добываемого флюида с промысловым оборудованием.

Известно, что главной целью любой нефтегазодобывающей компании является увеличение наработки погружного оборудования УЭЦН на отказ. Решение этой задачи является неотъемлемой частью стратегии по снижению

удельных затрат и повышению эффективности механизированной добычи нефти, особенно при усилении тенденции увеличения доли трудноизвлекаемой части запасов нефти.

Существующая структура запасов при известных технологиях добычи ставит задачи создания принципиально новых подходов не только с точки зрения разработки месторождений, а также с позиций борьбы с осложняющими отрицательными факторами, влияющими на эффективность эксплуатации нефтегазопромыслового оборудования.

Одной из перспективных технологий для борьбы с осложнениями, вызванными причинами геологического характера, является воздействие магнитным полем на осложненные нефтяные флюиды (ОНФ-системы). Технология магнитного воздействия относится к группе малоэнергетических технологий, позволяющих с малыми затратами перестраивать структуру жидких сред, уменьшая тем самым степень влияния осложняющих факторов. Данная технология, как сравнительно новый метод, имеет широкие перспективы стать одним из наиболее эффективных методов.

Проблемам эффективности эксплуатации установок электроцентробежных насосов при работе в осложнённых условиях посвящен фундаментальный труд М.Н. Персиянцева, рассмотрению различных осложнений в частности, посвящены работы следующих авторов: К.В. Черновой, Р.Р. Мусина, А.А. Лапшина, М.Р. Хужина, А.С. Топольникова, А.Р. Гарифуллина, О.М. Перельмана, А.А. Ишмурзина, С.В. Фролова, Н.И. Смирнова, С.С. Шубина, М.В. Прожега, В.А. Ведерникова.

Процессы изменения структуры, состава и свойств вследствие воздействия магнитным полем на водные и водно-нефтяные системы с осложнениями рассмотрены в трудах: В.И. Классена, Р.В. Спиридонова, К.В. Щурина, В.И. Лесина, Ю.В. Лоскутовой, Н.В. Юдиной, А.С. Колесникова, М.В. Козачок, Г.И. Жилина, Н.В. Инюшина, М.М. Хасанова, А.В. Исакова, А.Б. Лаптева. При этом в литературе нет данных об исследованиях конструктивных особенностей методов магнитного воздействия на

добываемый флюид с целью повышения эффективности и работоспособности УЭЦН при эксплуатации в осложнённых условиях, чему отчасти и посвящена работа.

Цель диссертационной работы

Разработка технических решений для повышения эффективности и работоспособности электроцентробежных насосов при эксплуатации в осложнённых условиях с использованием методов магнитного воздействия на добываемый флюид.

Идея работы заключается в повышении эффективности эксплуатации скважин электроцентробежными насосами, путём использования комплексного подхода в исследовании взаимодействия магнитного поля с жидкой средой с целью установления способов эффективного управления структурой, составом и гидродинамическими характеристиками жидкой среды.

Задачи исследования:

1. Рассмотреть область применения магнитного поля при эксплуатации электроцентробежных насосов в осложнённых условиях;
2. Выполнить анализ теоретических предпосылок и экспериментальных исследований применения магнитной обработки для воздействия на нефти особых составов;
3. Разработать нестандартную аппаратуру для проведения испытаний воздействия магнитного поля на осложнённые флюиды;
4. Провести экспериментальные исследования по воздействию магнитного поля на ОНФ-системы;
5. Исследовать процессы формирования структурообразования в ОНФ-системах при магнитной обработке;
6. Разработать технологические решения и рекомендации по использованию методов магнитной обработки добываемого флюида на нефтяных месторождениях.

Методы решения поставленных задач

Анализ теоретических предпосылок и экспериментальных исследований, проведение лабораторных экспериментов, построение физико-механических принципов структурообразования изучаемых процессов, лабораторные и графоаналитические методы, методы математической статистики.

Научная новизна работы:

1. Впервые экспериментально получен эффект диспергирования дисперсной минеральной фазы при воздействии магнитным полем, что позволяет рассматривать возможность применения магнитной технологии для управления таким осложнением как пескопроявление для минимизации воздействия на рабочие органы электроцентробежного насоса.

2. Выявлена зависимость интенсивности осаждения карбоната кальция от параметра пересыщения раствора при воздействии магнитным полем.

3. Установлен характер влияния магнитного поля на формирование структурообразования в солеотложении при магнитном воздействии, что позволяет рассматривать возможность применения магнитной технологии для управления таким осложнением как солеотложение для минимизации воздействия на рабочие органы электроцентробежного насоса.

4. Исследованы принципы формирования структурообразования в ОНФ-системе, позволяющие рекомендовать магнитную технологию для использования с целью управления такими осложнениями как пескопроявление и солеотложение.

Защищаемые научные положения:

1. Выявлена прямая зависимость интенсивности осаждения карбоната кальция от параметра пересыщения при воздействии магнитным полем. Воздействие магнитного поля в течении 15 секунд на водный раствор карбоната кальция увеличивает количество выпадающего осадка CaCO_3 на 24÷41%, эффект увеличивается от 24% до 41% по мере изменения параметра пересыщения от 0 до 1,2. Увеличение напряженности магнитного поля до 60

кА/м приводит к резкому повышению доли выпавшего осадка на $11\div 22\%$, дальнейшее повышение напряженности слабо влияет на выпадение осадка.

2. Наблюдается устойчивый эффект диспергирования элементов горной породы в составе композиций с дисперсной минеральной фазой. При воздействии магнитным полем напряженностью 120 кА/м на композицию водной суспензии с частицами-обломками песчаника среднечисленный диаметр частиц уменьшается в 1,5 раза, при воздействии на композицию нефти с частицами-обломками песчаника среднечисленный диаметр частиц уменьшается в 1,36 раза.

3. Эффективное магнитное воздействие на перекачиваемый флюид осуществляется рациональной компоновкой УЭЦН, включающей в себя электроцентробежный насос, состоящий из рабочих органов с постоянными магнитами из редкоземельного сплава особой конструкции, обеспечивающей увеличение времени воздействия магнитного поля на добываемый флюид и требуемую напряженность магнитного поля.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность научных положений основана на теоретических и экспериментальных исследованиях с использованием искусственной модели раствора карбоната кальция с заданными свойствами, естественных образцов нефти, пластовой воды и искусственного образца песчаника, а также собранной лабораторно-экспериментальной установки для исследования магнитного воздействия, в том числе теории экспериментальных исследований и использованием современных средств измерений, стандартных и взаимодополняющих методик проведения исследований.

Достоверность и обоснованность полученных результатов, научных положений и выводов, содержащихся в диссертационной работе, подтверждается согласованностью полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными.

Практическое значение работы:

1. Выполнен анализ и обобщение теоретических предпосылок и экспериментальных исследований применения магнитной обработки для воздействия на жидкие среды и на нефти в частности.
2. Создана лабораторная установка, используемая для изучения изменения ОНФ-систем при воздействии постоянным магнитным полем.
3. Получены показатели изменения характера структурообразования в пескопроявлении и солеотложении при воздействии магнитным полем.
4. Проведены исследования принципов формирования структурообразования в ОНФ-системах при магнитной обработке.
5. На основании проведенных лабораторных исследований и использования физико-механических принципов формирования структурообразования при воздействии магнитного поля на ОНФ-системы разработано техническое решение конструктивной компоновки УЭЦН (патент РФ №157504), включающей в себя электроцентробежный насос состоящий из рабочих органов с постоянными магнитами из редкоземельного сплава особой конструкции, обеспечивающей увеличение времени воздействия магнитного поля на добываемый флюид и требуемую напряженность магнитного поля.
6. Впервые предложен способ магнитного воздействия на перекачиваемый флюид в компоновке электроцентробежного насоса, рекомендуемый для использования на месторождениях с такими осложнениями как пескопроявления, солеотложения. Применение возможно как для воздействия на осложнения проявляющиеся в единичном случае, так и в комплексе.
7. Разработаны рекомендации по практическому использованию полученного научного результата при разработке и эксплуатации нефтяных месторождений.

Апробация работы

Результаты исследований и основные положения диссертационной работы докладывались на: конференции научно-технического творчества молодежи ОАО "Славнефть-Мегионнефтегаз", секция: "Добыча и подготовка нефти" (Мегион, 2011 г., диплом I степени); научно-практической конференции молодых специалистов ЗАО "РОСПАН ИНТЕРНЕШНЛ", секция: "Добыча нефти и газа" (Новый Уренгой, 2012 г., диплом I степени); Российской технической нефтегазовой конференции и выставке SPE по разведке и добыче, секция аспирантских работ (Москва, ВВЦ, 2012 г.); научно-практической конференции молодых специалистов ТНК-ВР, секция: "Добыча нефти и газа" (Тюмень, 2012 г., диплом - Лучший инновационный проект); научно-практической конференции молодых специалистов ЗАО "РОСПАН ИНТЕРНЕШНЛ", секция: "Добыча нефти и газа" (Новый Уренгой, 2013 г., диплом I степени); региональной научно-практической конференции молодых специалистов ОАО "НК "Роснефть", секция: "Добыча нефти и газа" (Тюмень, 2013 г., диплом - Лучший инновационный проект), XVI и XVII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых (Томск, ТПУ, 2012-2013 гг.).

Публикации

Результаты выполненных исследований отражены в 8 печатных работах, в том числе в 6-ти статьях, опубликованных в изданиях, входящих в перечень ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Структура и объём диссертационной работы

Диссертация содержит введение, пять глав и заключение. Работа изложена на 174 страницах машинописного текста, включая 80 рисунков, 20 таблиц, 2-х приложений и списка использованных источников из 124 наименований.

ГЛАВА 1 МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ОСЛОЖНЁННЫХ УСЛОВИЯХ

Работа электроцентробежных насосов (ЭЦН) в осложнённых условиях добычи предъявляет повышенные требования, как к отдельным элементам конструкции, так и в целом к ЭЦН как к сложному агрегату.

На рис. 1.1 представлена схема установки электроприводного центробежного насоса [1].

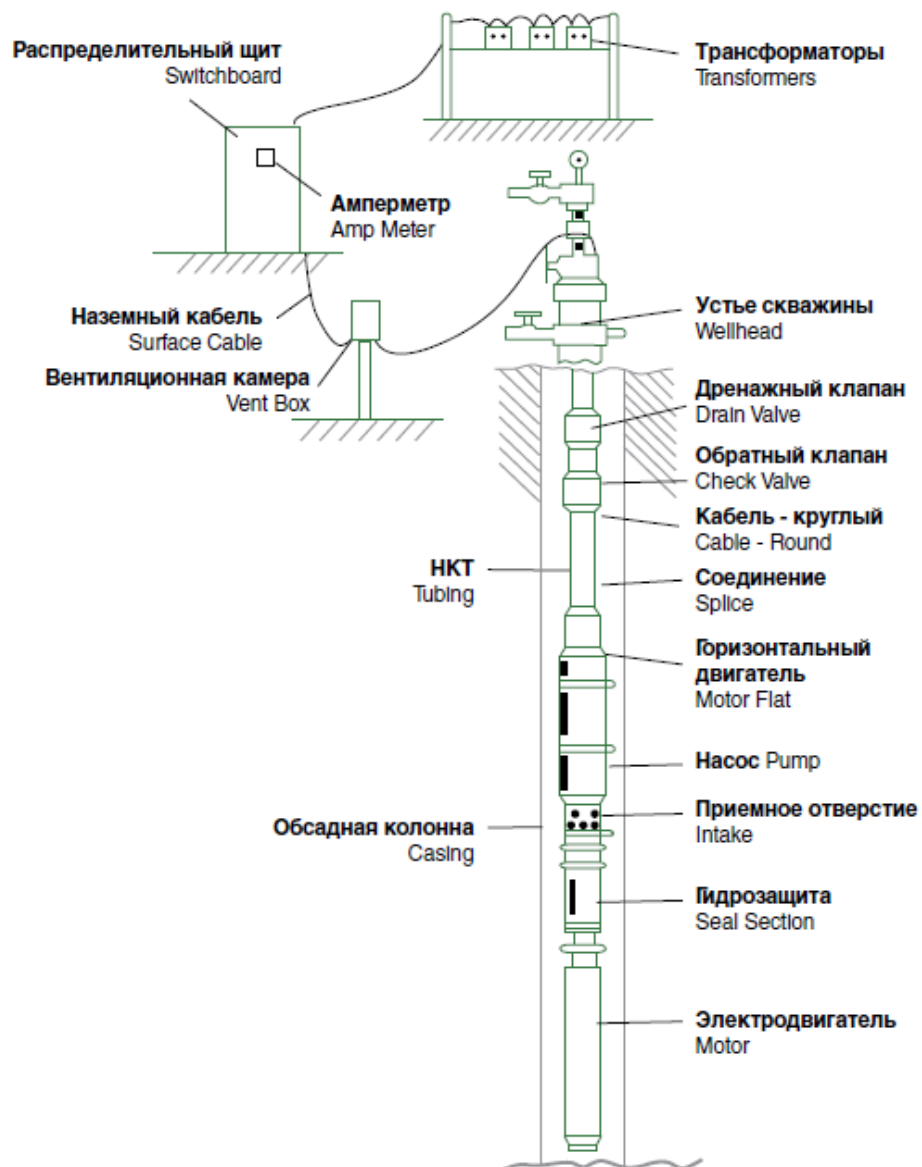


Рисунок 1.1 – Схема установки электроприводного центробежного насоса [1]

В то же время, необходимо указать, что нагрузка на элементы ЭЦН распределена не равномерно, и некоторые узлы испытывают более интенсивное воздействие, чем другие.

К числу наиболее нагруженных элементов относится рабочее колесо, которое испытывает максимальный уровень нагрузок, связанных с одновременным воздействием на него сил, возникающих при вращении и сопутствующих колебаниях, а также при взаимодействии с флюидами в условиях влияния отрицательных факторов - солей, песка, газового фактора и других осложнений.

Основной износ за счет различных факторов приходится на рабочие колеса.

Рабочее колесо:

- является главной частью центробежного насоса;
- обеспечивает бесперебойную подачу жидкости;
- в большинстве случаев колеса определяют срок службы насоса.

Таким образом, рабочее колесо представляет собой наиболее уязвимый элемент в конструкции насоса, лимитирующий основные эксплуатационные параметры насоса – срок службы, надежность и др.

1.1 Общие представления о видах и характере осложнений нефтедобычи

Для современного состояния нефтедобывающей промышленности страны характерна выраженная тенденция ухудшения качества ресурсной базы, увеличение доли трудноизвлекаемых запасов в структуре активов нефтяных компаний и как следствие осложнение условий эксплуатации [2-4].

К трудноизвлекаемым относят нефти либо по качеству сырья:

- тяжелые (плотность более 0,92 г/см³);
- высоковязкие (более 30 МПа•с);

- либо по условиям залегания - проницаемость коллекторов менее 0,05 мкм.

Месторождения с трудноизвлекаемыми нефтями в ходе эксплуатации характеризуются низкими и неустойчивыми дебитами скважин, что предопределяет необходимость использования адекватных по составу осложнений методов и технологий разработки.

Структура остаточных запасов нефти резко ухудшается из-за выборочной эксплуатации лучшей части запасов, особенно для крупных (запасы более 30 млн. т) месторождений, которые обеспечивают 2/3 добычи нефти в стране.

Ухудшение качества запасов крупных разрабатываемых месторождений вызвано их высокой выработанностью, достигающей 52%, а по многим из них достигающая 70 - 80%, то есть лучшая часть этих месторождений выработана, а оставшаяся - трудноизвлекаемые запасы нефти [3].

Тенденция увеличения доли трудноизвлекаемой нефти в её запасах будет в будущем только усиливаться. Существующая структура запасов при известных технологиях добычи ставит задачи создания новых принципиальных подходов.

Оставшееся количество пригодных для рентабельной в современных условиях отработки промышленных запасов нефти может обеспечить её добычу только на короткое время.

К осложнённым условиям добычи могут быть отнесены факторы [2-4]:

- солеобразование и солеотложение;
- пескообразование;
- обводнение;
- газовый фактор;
- низкая проницаемость и сложное строение пород-коллекторов;

- повреждение пласта-коллектора с проявлениями - пробкообразование, сужение стенок скважины, обрушение стенок скважины и др.;
- снижение пластового давления;
- кавитация;
- отложения парафинов;
- эмульгирование нефти в воде;
- износ оборудования и др.

Состав осложнений добычи индивидуален для каждого месторождения. Кроме того, осложнения могут иметь разную интенсивность. В случае, когда одновременно действуют несколько осложнений, проблема управления добычей имеет комплексный характер.

Можно выделить две группы месторождений со значимыми факторами осложнений:

- месторождения, для которых характерны этапы проявления осложнений - изначально они отсутствуют, а проявляются на некоторых стадиях эксплуатации;
- месторождения, для которых характерно присутствие осложнений изначально, при этом осложнения как системная группа могут по мере эксплуатации эволюционировать, меняя свой состав и интенсивность.

Рассмотрим примеры тех и других месторождений.

К месторождениям первого типа, в которых осложнения добычи изначально не проявляются, а формируются по ходу эксплуатации, относится часть месторождений Тимано-Печорской НГП и Западно-Сибирской НГП с благоприятными для извлечения запасами (рис. 1.2) [4,5].

Для сравнения приведены данные по Волго-Уральской НГП, где благоприятные для извлечения запасы практически выработаны, а доля осложненных нефтей (тяжелые нефти) составляет более 75%.

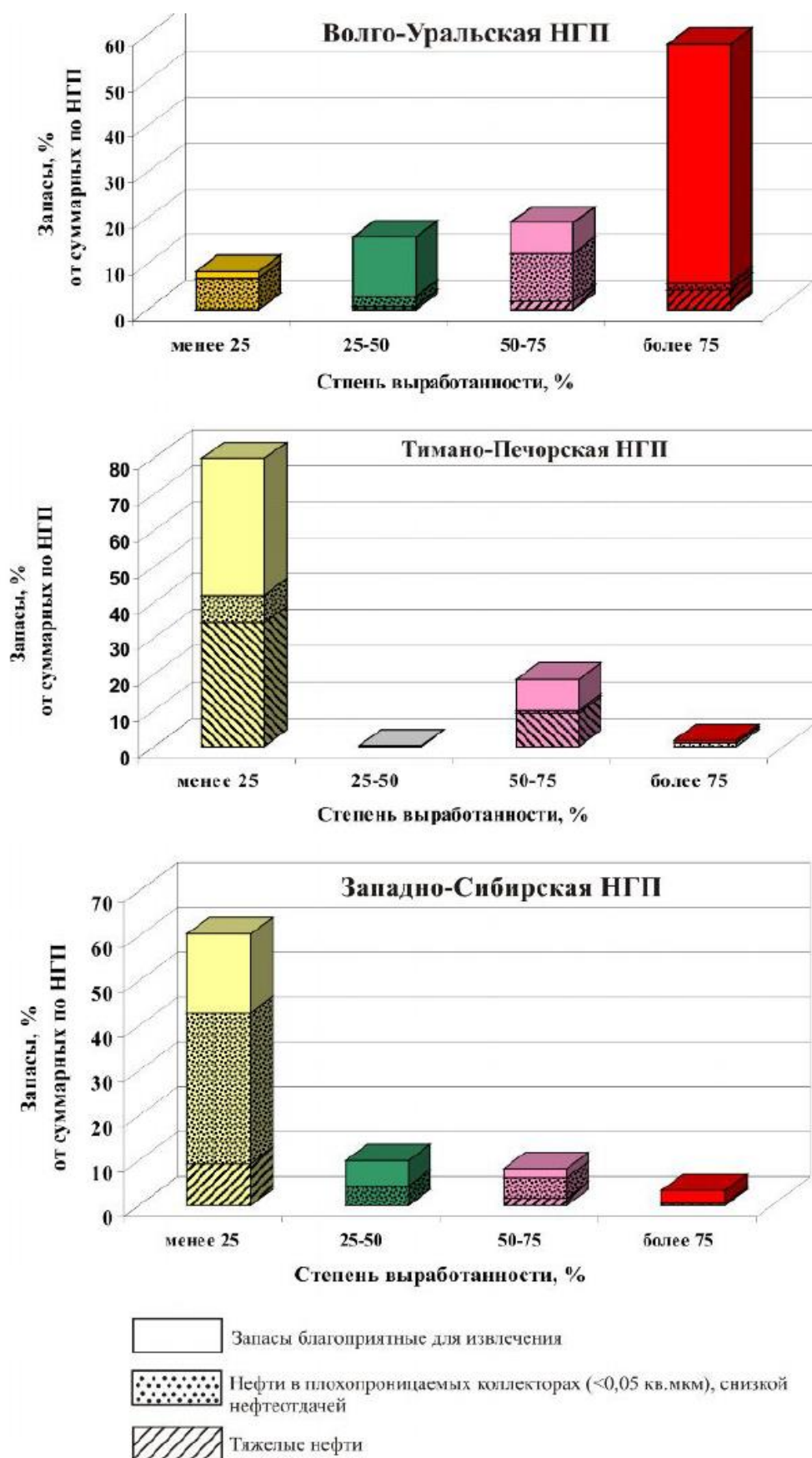


Рисунок 1. 2 – Распределение и структура нефтей по степени их выработанности [4]

Пример месторождения с изначальными осложнениями - Приобское месторождение, расположенное в Ханты-Мансийском районе Ханты-Мансийского автономного округа Тюменской области. Открыто в 1982 г., разрабатывается с 1988 г. Приобское месторождение входит в группу объектов настоящего диссертационного исследования.

В Юганском регионе Приобское месторождение - основной перспективный объект. Запасы Приобского месторождения относятся к категории трудноизвлекаемых. Пласты сильно расчленены и имеют крайне низкую проницаемость, что может рассматриваться как факторы осложнений добычи. По результатам анализа геолого-промысловой информации нами приведена хронология основных этапов разработки месторождения.

До 1996 г освоение месторождения шло медленными темпами из-за сложностей с формированием системы заводнения.

В 1996 г. была разработана технология увеличения продуктивности как добывающих, так и нагнетательных скважин с эффективной системой заводнения, что позволило значительно поднять динамику добычи нефти и увеличить продуктивность скважин (рис. 1.3 и 1.4).

Фактически, приобщение пластов вместе с ГРП позволили «оживить» месторождение.

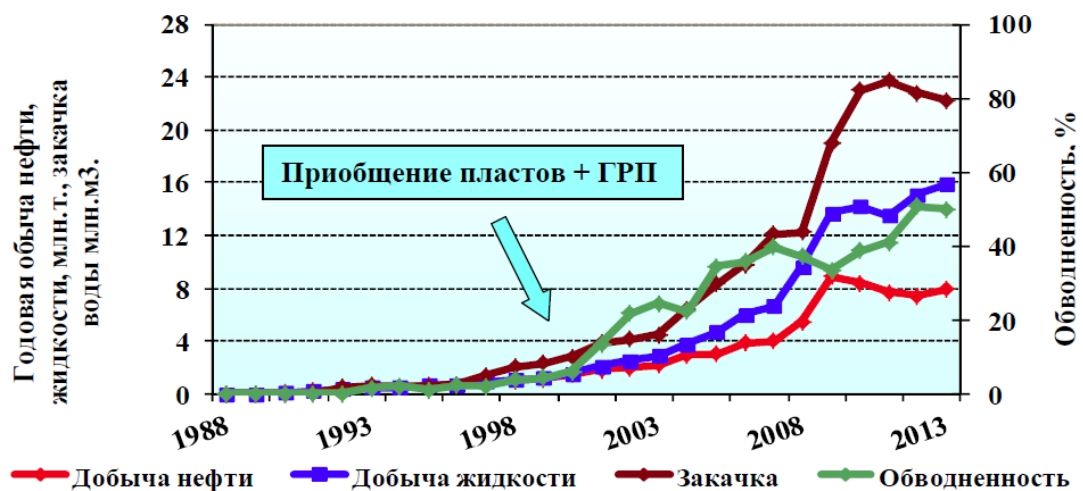


Рисунок 1.3 – Динамика добычи нефти, жидкости и закачки Левобережной части месторождения

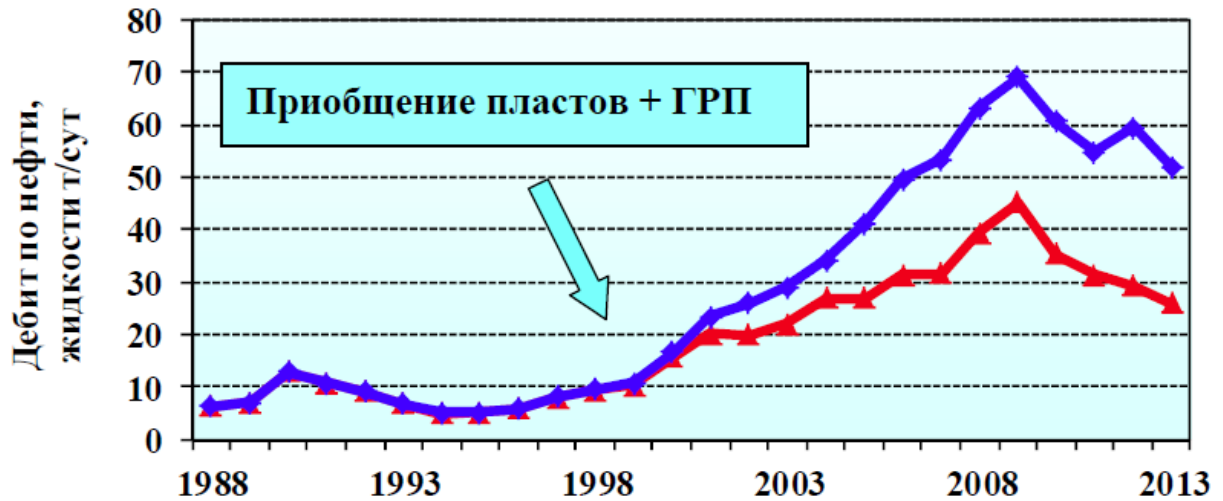


Рисунок 1.4 – Средний дебит жидкости и нефти скважин Левобережной части месторождения

Следует отметить, что примененная технология приводит к росту обводненности - фактору осложнений, интенсивность которого возрастает по мере эксплуатации, рис. 1.5.

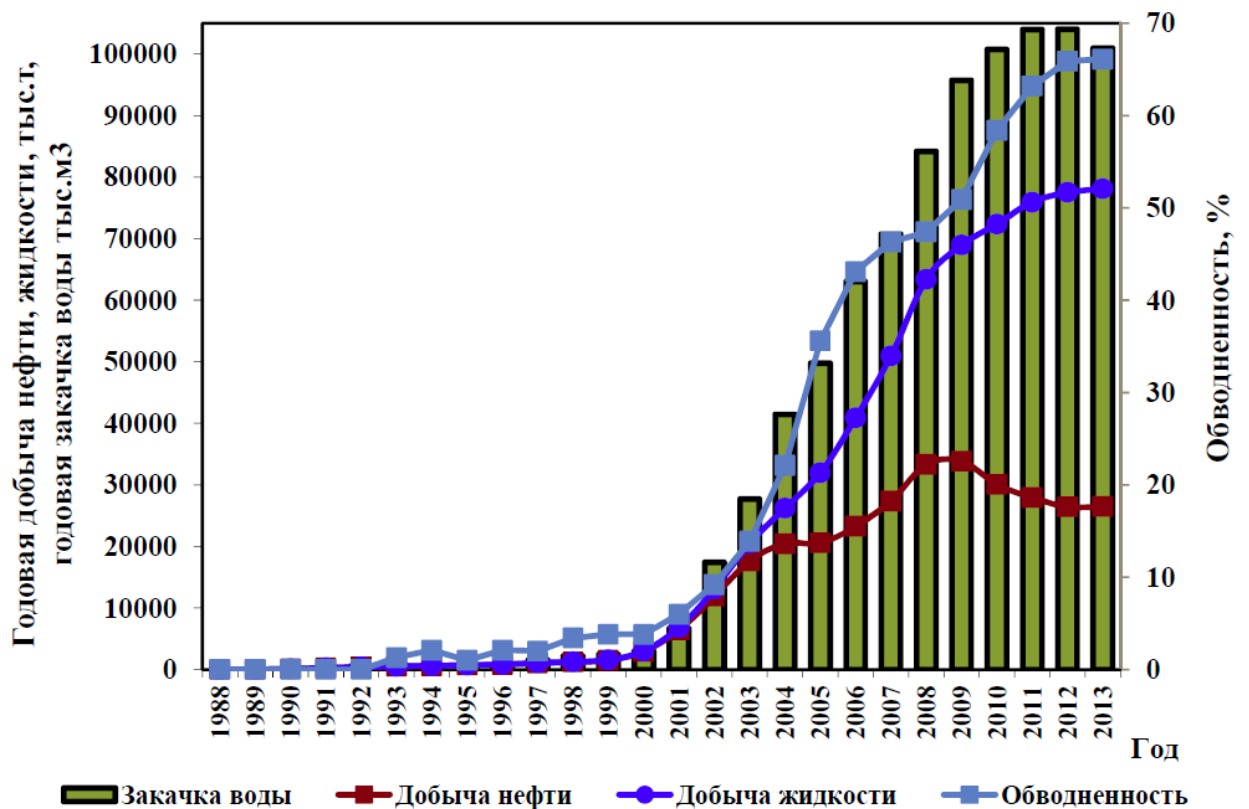


Рисунок 1.5 – Динамика показателей разработки Приобского месторождения

Анализа геологических данных позволяет утверждать, что при применении новых технологий (заходнение, ГРП и др.) проявляются факторы осложнений.

В [6] осложнения добычи систематизированы по причинам возникновения и последствиям. В соответствии с рассмотренной систематизацией сформирован перечень осложняющих факторов, рис. 1.6.



Рисунок 1.6. Причины и последствия осложнений добычи

Приведенная на рис. 1.6 систематизация осложнений добычи рассматривается как некоторое приближение к описанию сложной системной группы осложнений, внутри которой имеются внутренние связи между указанными градациями и отдельными осложнениями. Природа (генезис) осложнений также представляет значительный интерес.

Этот вопрос станет предметом изучения при углубленном исследовании таких осложнений как пескопроявления, солеотложения и парафиноотложения.

Как в случае месторождений в стадии завершения проявления осложнений неизбежны во всех случаях.

1.2 Анализ последствий воздействия осложнений на электроцентробежные насосы

1.2.1 Общие подходы при описании воздействий осложнений на электроцентробежные насосы

Анализ последствий воздействия осложнений на показатели работы электроцентробежных насосов выполнен на основании данных работ [7-10].

Солеотложение – одна из главных причин отказа УЭЦН, рис. 1.7 [7].

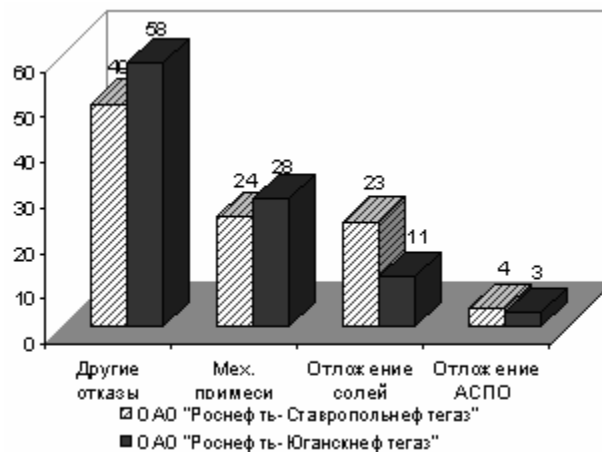


Рисунок 1.7 – Отказы УЭЦН по разным причинам (% от общего числа отказов) [7]

В результате солеотложения имеет место значительная деградация рабочих поверхностей ЭЦН, рис. 1.8 [8].

Среди причин солеобразования выделены: высокая обводненность, агрессивность среды, присутствие во флюиде растворимых минералов, образование завихрений и застойных зон в насосе, изменение термобарических условий в насосе, высокая адгезия солей и ряд других факторов.



Рисунок 1.8 – Отложение солей на рабочих поверхностях ЭЦН [8]

Характер осадка на поверхности ЭЦН свидетельствует о том, что между осадком и материалом колеса имеется взаимодействие, достаточное чтобы удерживать химические соединения осадка на поверхности колеса. Такое взаимодействие возможно при условии высокого химического сродства осадка и материала колеса, что в свою очередь проявляется в таких процессах как смачивание, растекание осадка по поверхности колеса и адгезионного удержания осадка на колесе.

Можно предположить, что результатом взаимодействия осадка и колеса станет химическая поверхностная коррозия колеса, приводящая к вымыванию из поверхностных слоев колеса межкристаллитных элементов и снижению физико-механических свойств колеса, а на определенных стадиях и к разрушению колеса. Однако эти вопросы пока еще не стали предметом исследования, что препятствует пониманию механизмов конденсации солей, и выработке действенных способов управления указанными процессами.

В [9] приводится состав осложнений и доля по отдельным осложняющим факторам на месторождениях ОАО «Варьеганнефтегаз» (ОАО «ВНГ»):

- механические примеси (пескопроявления) - $20 \div 40\%$;
- солеотложения - $6 \div 18\%$;
- коррозионно-эрозионным износ и агрессивная среда - $6 \div 25\%$;
- повышенное газосодержание - $1 \div 4\%$;
- парафиногидратные отложения - $1 \div 3\%$.

Как следует из приведенных данных, из числа факторов осложнений преобладают пескопроявления.

В работе [10] выполнены исследования с целью повышения эффективности эксплуатации скважин в осложнённых геолого-промысловых условиях. В рамках данной работы проведён анализ распределения удельного количества отказов скважин оборудованных УЭЦН по причинам осложнений, рисунок 1.9.

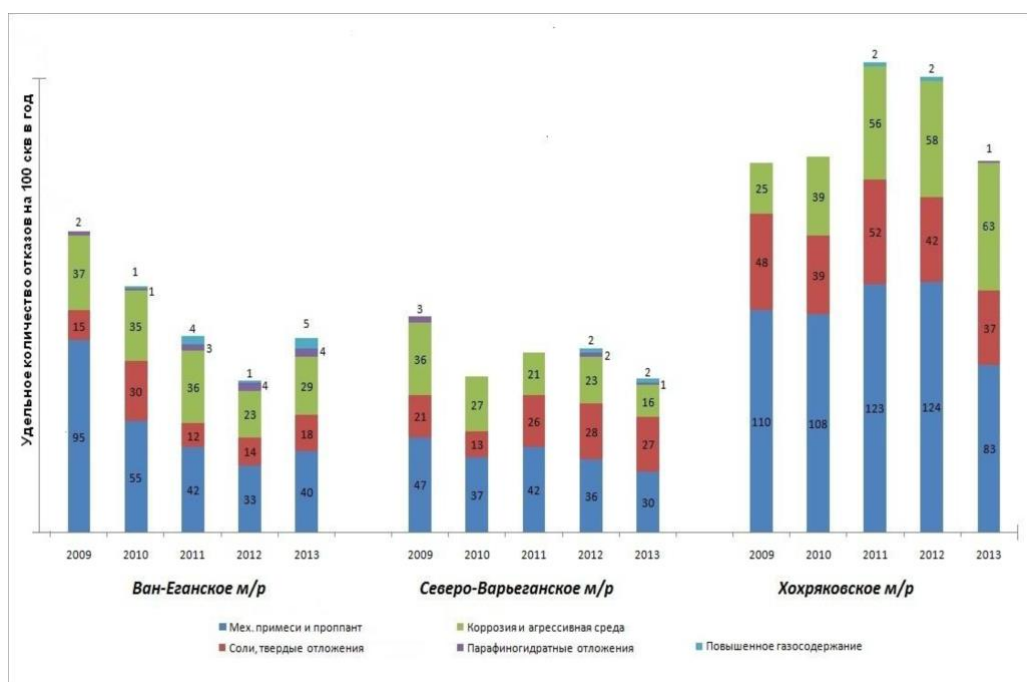


Рисунок 1.9 – Распределение удельного количества отказов на 100 скважин в год действующего фонда УЭЦН из-за различных видов осложнений при добыче нефти по месторождениям ОАО «ВНГ» [10]

Графический анализ демонстрирует преобладание таких основных осложняющих факторов эксплуатации УЭЦН как механические примеси и

солеотложения. Влияние данных осложнений усиливается агрессивной средой и в комплексе, как следствие, снижает эффективность эксплуатации УЭЦН.

В исследовании [9] представлены данные по осложненному фонду некоторых отечественных нефтедобывающих предприятий, табл. 1.1.

Как следует из табл. 1.1, в ряде случаев на механические примеси (пескопроявления) приходится преобладающая доля осложнений добычи, однако на некоторых месторождениях значительный процент осложнений приходится на парафины, газ и эмульсии.

Таблица 1.1 – Статистика по осложненному фонду скважин [9]

Предприятие	Газпромнефть- Ноябрьскнефтегаз	Роснефть- Ставрополь нефтегаз	Роснефть- Пурнефтегаз	Томск нефть	Белкам нефть
Неосложненный фонд, %	-	37	-	25	37
Мехпримеси, %	32	73	74	14	31
Соли, %	25	20	24	10	-
Коррозия, %	-	22	10	4	2
Парафины, %	37	11	33	3	74
Газ, %	23	16	39	20	-
Температура, %	-	-	19	18	-
Эмульсия, %	-	-	-	-	24

Во многих компаниях ведутся статистические наблюдения за динамикой отказов УЭЦН, что позволяет проанализировать причины отказов. Отказы - показатель надежности, широко используемый при анализе сложных систем.

На рис. 1.10 отражены показатели работы фонда УЭЦН ООО «РН-Юганскнефтегаз» [11].

Стоит отметить, что данная картина демонстрирует увеличение показателя МРП за отражаемый период, а так же показателя СНО. В свою очередь снижается коэффициент отказности с 5,2% до 4,6 %. Действующий фонд парка УЭЦН на ноябрь 2013 года составляет 8855 штук.

На рис. 1.11 отражена статистика причин отказа по результатам разборов установок ЭЦН. Из представленной статистики трёх лет

эксплуатации (2011-2013 гг.) парка УЭЦН видно, что основные осложняющие факторы вызывающие отказы оборудования - механические примеси и солеотложения.



Рисунок 1.10 – Показатели работы фонда УЭЦН ООО «РН-Юганскнефтегаз» [11]

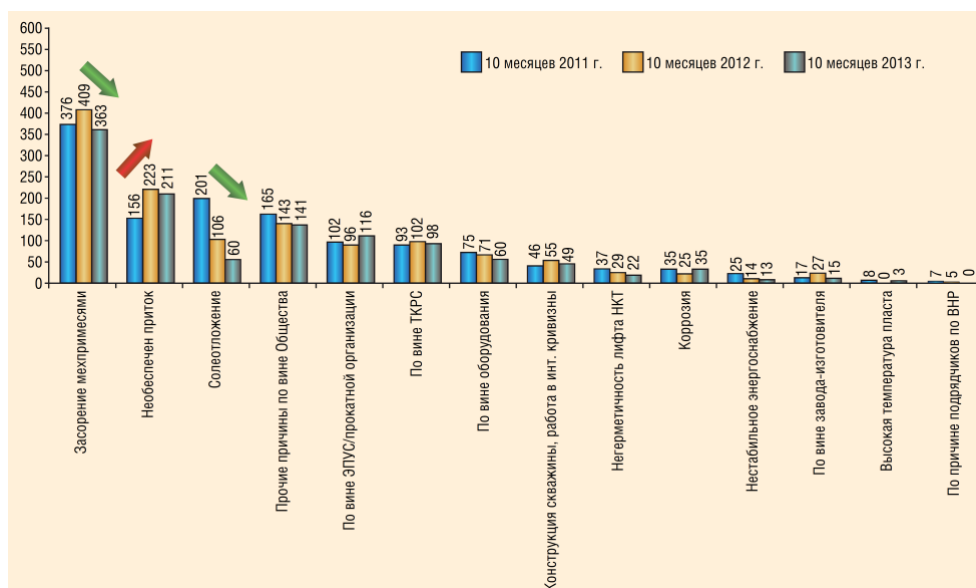


Рисунок 1.11 – Динамика и структура причин отказов УЭЦН ООО «РН-Юганскнефтегаз» [11]

В работе [12] представлен расширенный анализ осложнений при эксплуатации УЭЦН в масштабе крупной нефтегазодобывающей компании, рис. 1.12. Данные показывают, что основные осложнения по фонду вызваны группой из трёх факторов: механические примеси, АСПО и солеотложения. Так же стоит отметить, что данная тенденция сохраняется и в причинах отказов за рассматриваемый период.

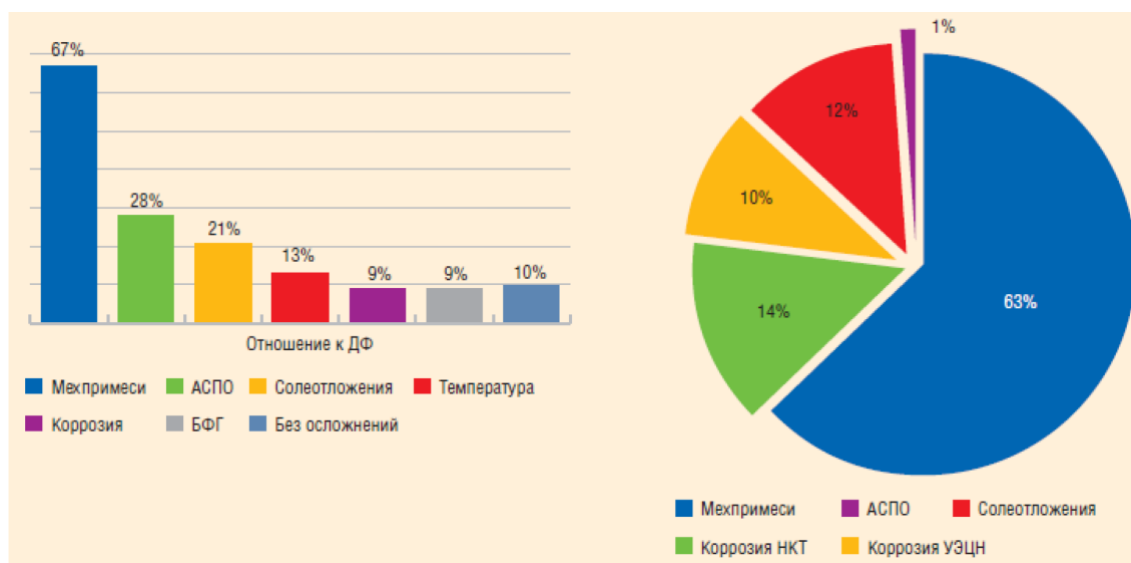


Рисунок 1.12 – Структура осложнённого фонда и причин отказов УЭЦН большинства добывающих скважин ОАО «НК «Роснефть» за 2010 год [12]

Как указывалось, выше, механические примеси (пескопроявления) относятся к группе наиболее значимых факторов, снижающих эффективность работы УЭНЦ. Проблеме воздействия механических примесей на работу УЭНЦ посвящены работы разных авторов, например, [13-14].

Наибольший интерес вызывают те работы, в которых ставится задача системного увязывания характеристик пескопроявления и эффективности работы УЭНЦ. Так, в [13] прослежена взаимосвязь между степенью износа ЭЦН и потоком жидкости с твердыми частицами, рис. 1.13.

Представленные на рис. 1.13 данные получены в результате теоретических и модельных исследований влияния механических примесей

на абразивный износ деталей ЭЦН. Как видно из графиков на рис. 1.13, в результате износа эффективность работы ЭЦН резко снижается.

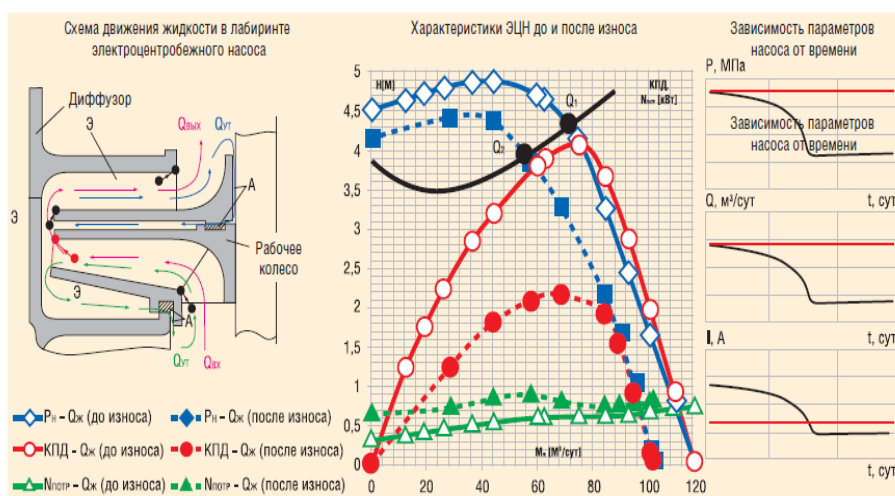


Рисунок 1.13 – Определение степени износа ЭЦН потоком жидкости с твердыми частицами [13]

В [14] систематизированы данные по гранулометрическому составу частиц в добываемом флюиде действующего фонда скважин по содержанию взвешенных частиц, рис. 1.14.

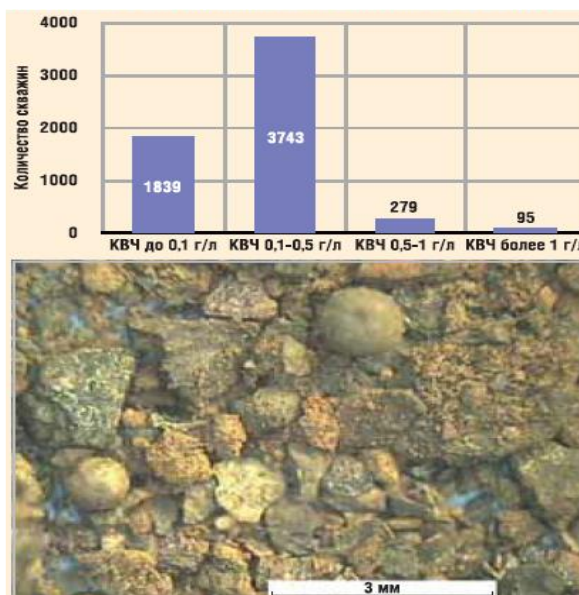


Рисунок 1.14 – Структура действующего фонда скважин по содержанию взвешенных частиц [14]

Из рис. 1.14 видно, что для большинства скважин концентрация взвешенных частиц составляет 0,1- 0,5 г/л. По гранулометрии частиц можно отметить, что присутствуют как сравнительно крупные частицы, так и фракции тонких размеров.

Необходимо отметить, что вопросы исследования влияния пескопроявления на эффективность работы УЭНЦ, а также на характер абразивного износа колес изучены недостаточно полно. Так, остаются не проясненными вопросы строения механических частиц как агрегатов микрозерен, что представляет интерес в плане задач настоящей работы. Не решены также вопросы механизмов воздействия механических частиц на структуры и микроструктуру колес, а также на меру разупрочнения колес в зависимости от характеристик потока частиц, их вида и материалов колес.

В работе [15] исследованы условия образования твёрдых частиц высокомолекулярных компонентов нефти (парафинов и асфальтенов) и способы повышения эффективности эксплуатации скважин электроцентробежными насосами.

На рис. 1.15 приведена классификация методов предупреждения и борьбы с образованием водонефтяных эмульсий.

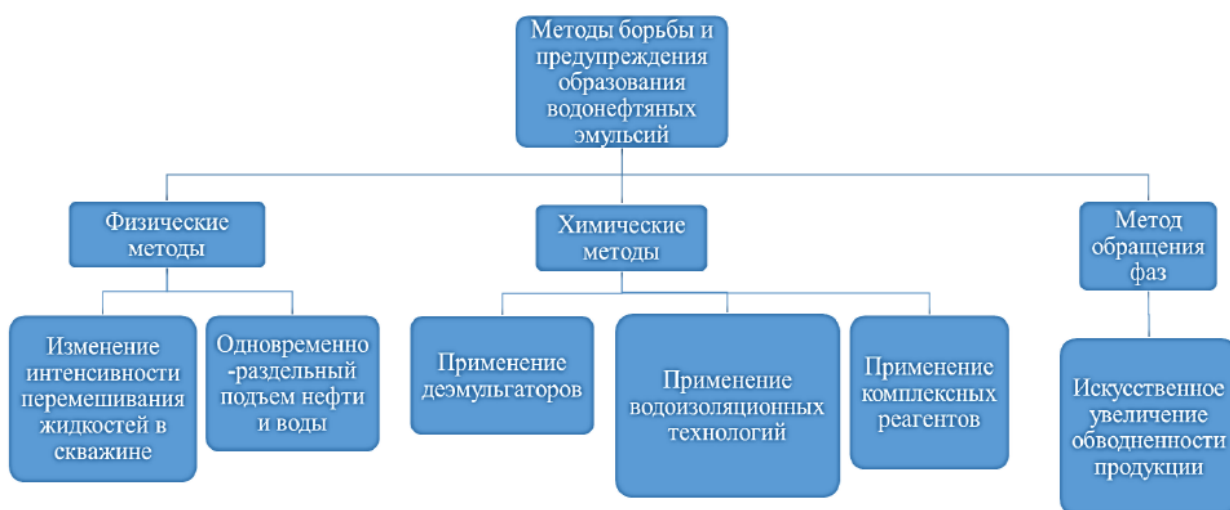


Рисунок 1.15 – Классификация методов предупреждения и борьбы с образованием водонефтяных эмульсий [15]

Влияние газового фактора на работу УЭЦН рассмотрено в [16], где показано, что использование центробежно-вихревой ступени позволяет повысить устойчивость режима работы УЭЦН к газовому фактору. Указанная конструкция позволяет диспергировать пузырьки газа в области вихревого венца, что повышает устойчивость работы насоса при перекачке нефтеводогазовых смесей.

1.2.2 Методология сложных систем и теории вероятностей при исследовании надежности работы УЭЦН

Электроцентробежные насосы сами по себе и технические комплексы с УЭЦН, как например: скважина – УЭЦН, представляют собой сложные системы, при создании и эксплуатации которых широко используется методология теории сложных систем [17], теории надежности [18], теории вероятностей и математической статистики [19].

Методология сложных систем и теории вероятностей - один из ключевых направлений в данной работе, так как цель исследований – поиск технических решений с целью повышения надежности и безотказности системы УЭЦН.

На основании использования методов теории надежности сложных систем можно определить комплексные и элементные параметры работоспособности УЭЦН, а также рассчитать прогнозные характеристики надежности и разработать методы повышения работоспособности и надежности УЭЦН.

Ниже приводятся примеры некоторых подходов методологии сложных систем и теории вероятностей при исследовании надежности работы УЭЦН.

В [20] для оценки эффективности работы УЭЦН применили параметры надежности и определяли вероятность безотказной работы $P(t)$ или доли оборудования, отработавшая время t без отказов.

На рис. 1.16 приведена классификация видов надежности системы скважина – УЭЦН.

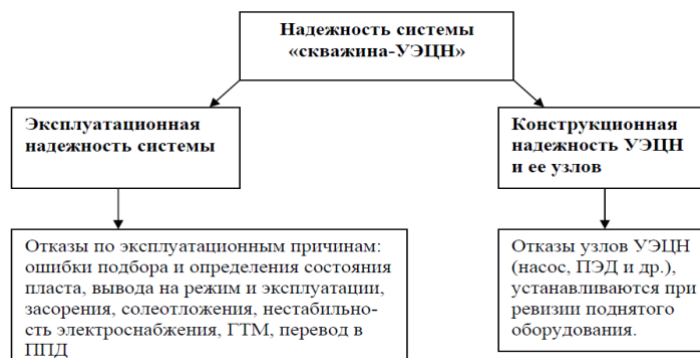


Рисунок 1.16 – Классификация видов надежности системы скважина – УЭЦН [20]

Основные аналитические соотношения для расчета надежности:

- временная зависимость вероятности безотказной работы $P(t)$:

$$P(t) = \exp(-a_n t^n - a_{n-1} t^{n-1} - \dots - a_1 t) \quad (1.1);$$

- плотность вероятности $f(t)$:

$$f(t) = -dP/dt \quad (1.2);$$

- интенсивность отказов $\lambda(t)$ - отношение числа отказавших установок к числу исправных за единицу времени:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{a_n t^n - a_{n-1} t^{n-1} - \dots - a_1 t}{\exp(-a_n t^n - a_{n-1} t^{n-1} - \dots - a_1 t)} \quad (1.3);$$

- среднее время безотказной работы T_m :

$$T_m = \int_0^\infty t f(t) dt = \int_0^\infty P(t) dt = \int_0^\infty \exp(-a_n t^n - a_{n-1} t^{n-1} - \dots - a_1 t) dt \quad (1.4)$$

На рис. 1.17 представлено сравнение надежности насосов 1ВННП5-25 и ЭЦН5-20 по среднему времени безотказной работы.

Сравнение надежности насосов выполнено с использованием методики определения надежности погружных установок по неполным эксплуатационным данным. Методика построена на сочетании вычислительных алгоритмов непараметрической статистики, и

параметрической статистики, позволяющих прогнозировать работу оборудования.

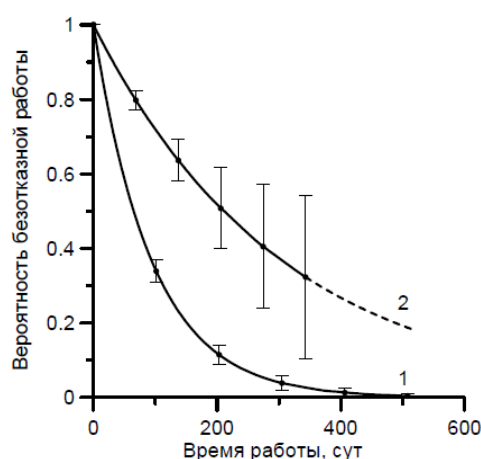


Рисунок 1.17 – Сравнение надежности насосов 1ВННП5-25 и ЭЦН5-20 по среднему времени безотказной работы $T(m)$: 1 – ЭЦНМ5-20 без промежуточных подшипников, всего 151 шт., $T(m) = 95 \pm 20$ сут.; 2 – 1ВННП5-25 с промежуточными подшипниками, всего 31шт, $T(m) = 300 \pm 200$ сут [20]

Сравнение надежности насосов 1ВННП5-25 и ЭЦН5-20 по статистической методике оценки надежности показала, что поскольку кривая 2 (новая конструкция) идет выше кривой 1 (старая конструкция), то можно утверждать, что надежность насосов новой конструкции выше, чем старой.

В [21] приведено статистически обработанное распределение количества аварий в зависимости от наработки УЭЦН до отказа, рис. 1.18.

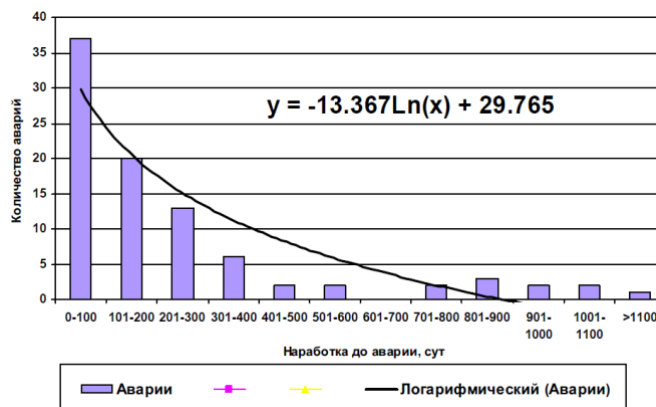


Рисунок 1.18 – Распределение количества аварий в зависимости от наработки УЭЦН до отказа [21]

Как следует из рисунка 1.18, аварии носят интенсивный характер в начальный стодневный период эксплуатации УЭЦН, затем, убывая по логарифмической закономерности. При сроке работы более 400 суток аварийные отказы становятся единичными, что свидетельствует о том, что аварийные отказы к износу отдельных узлов оборудования прямого отношения не имеют.

Приведенные примеры не исчерпывают случаев использования элементов методологии сложных систем и теории вероятностей, что подтверждают работы [22 - 26 и др.]. Можно констатировать, что методологии сложных систем и теории вероятностей становится основным инструментом анализа надежности и разработки методов совершенствования работы УЭЦН в условиях осложнений.

Следует указать на то, что применение методов теории надежности сложных систем и теории вероятностей требует выполнения большого объема экспериментальных исследований и проверки выполнимости исходных предпосылок, например, независимости случайных событий.

В случае, если эти условия не выполнены, интерпретация экспериментальных данных может сопровождаться системными ошибками.

1.3 Принципы управления эффективностью работы электроцентробежных насосов при эксплуатации в осложнённых условиях

Существующие методы управления эффективностью работы электроцентробежных насосов при эксплуатации в осложнённых условиях непосредственно связаны с достигнутым уровнем понимания механизмов влияния осложнений на работу УЭЦН. Как было показано выше, указанные механизмы влияния осложнений в ряде случаев проработаны недостаточно полно, прежде всего, в плане изучения природы процессов, протекающих в уязвимых узлах УЭЦН (например, рабочее колесо) в осложненных условиях.

К числу основных методов управления эффективностью работы электроцентробежных насосов относятся [27-41]:

- использование новых материалов и технологий поверхностного модифицирования деталей УЭЦН [27-30];
- совершенствование конструкции и режимов работы УЭЦН [31-33];
- методы предупреждения парафиноотложений [15];
- методы подбора электроцентробежных насосов в скважины с высоким газовым фактором [34];
- противопесочные технологии (фильтры и др.) [13,35];
- методы предупреждения солеотложения и коррозии [36,37];
- использование методов воздействия на нефть электромагнитными полями [38-41] и другие методы.

В отношении преимуществ и недостатков методов управления эффективностью работы УЭЦН необходимо указать на то, что как было показано ранее, состав осложнений как системная группа индивидуален по отношению к конкретному месторождению. Из этого следует, выбор методов управления эффективностью работы УЭЦН также индивидуален по отношению к конкретному месторождению. В различные периоды эксплуатации скважин активизируется одно или несколько осложнений, и востребованы могут быть определенные методы управления эффективностью. При этом необходимо принять во внимание, что в ряде случаев методы управления эффективностью (например, использование противопесочных фильтров) требуют значительных материальных затрат, а положительный эффект достигается только на протяжении короткого времени. Так, в случае использования противопесочных фильтров при интенсивном пескопроявлении происходит их быстрая забивка, и возникает проблема восстановления работоспособности фильтров.

Так же стоит отметить, что при проявлении комплекса отрицательных факторов (механические примеси, солеотложения, парафиноотложения)

необходимо применение ряда методов для защиты подземного оборудования, что повышает себестоимость добываемой продукции. Таким образом, единственным способом для достижения наиболее эффективной эксплуатации УЭЦН является поиск комплексного метода защиты обеспечивающего предотвращение ряда осложнений, что в свою очередь делает возможным достижение необходимых показателей средней наработки на отказ погружного оборудования УЭЦН являющихся экономически целесообразными.

В настоящей работе в качестве базовых рассматриваются такие осложнения как пескопроявления, солеотложения и парафинообразования. Обоснование выделения этих осложнений будет выполнено позднее при описании месторождений - объектов исследования.

Возможной технологией позволяющей решить поставленные задачи является магнитное воздействие на перекачиваемую среду посредством технических решений с применением высокоэнергетических магнитных соединений. Методы магнитной обработки нефти известны достаточно давно, но на практический уровень вышли сравнительно недавно [38-42].

Привлекательность метода магнитной обработки нефти состоит в сравнительной простоте аппаратных решений, высокой производительности и значимости достигаемого эффекта.

Магнитная обработка относится к группе малоэнергетических технологии (акустические, вибрационные, магнитные и др.), позволяющих с малыми энергетическими затратами перестраивать структуру жидких сред.

С помощью магнитной обработки можно воздействовать на дисперсно-коллоидную структуру нефти, снижать ее вязкость (η) (табл. 1.2 и рис. 1.19) и размеры нефтяных ассоциатов [40, 108].

Таблица 1.2 – Реологические параметры нефтей до и после магнитной обработки [40]

Нефть	η , мПа·с	τ_c , Па	E_a , кДж/моль
Таймурзинская нефть			
До МО	778,1	303,2	12,8
После МО (0 ч)	605,0	257,3	8,2
Через 24 ч	754,6	284,5	10,9

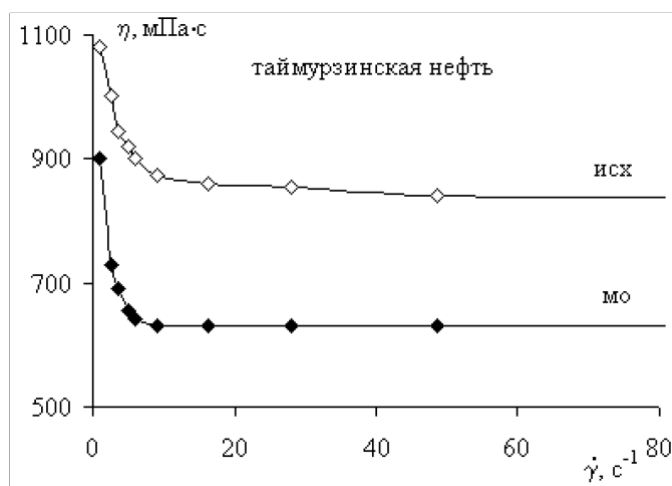


Рисунок 1.19 – Зависимость динамической вязкости нефтей от скорости сдвига: исх – до магнитной обработки; мо – после [40]

В [39] отмечено, что механизм предупреждения и снижения интенсивности солеотложений может состоять в том, что магнитное воздействие на нефти способствует созданию дополнительных центров кристаллизации.

В [41] показано, что при определенных условиях эффективными могут быть методы разделения эмульсий при сочетании магнитного поля и термохимических методов.

Вместе с тем, следует отметить, что вопросы влияния магнитного поля на осложненные флюиды пока еще мало исследованы, что и явилось предметом данного диссертационного исследования.

В табл. 1.3 приведены сравнительные данные по методам управления эффективностью работы электроцентробежных насосов.

Таблица 1.3 – Сравнительные данные по методам управления эффективностью работы электроцентробежных насосов

№	Наименование метода	Достоинства метода	Недостатки метода
1	Использование новых материалов и технологий поверхностного модифицирования деталей УЭЦН	Избирательность по отношению к видам осложнений и их конкретных форм	Сложность подбора и реализации технологий поверхностного модифицирования деталей, а также изготовления новых деталей.
2	Противопесочные технологии (фильтры и др.)	Большой опыт применения и многообразие аппаратурных вариантов и технологий	Высокая стоимость и трудозатратность
3	Методы предупреждения солеотложения и коррозии	Эффективность в случае отдельных солей	Малая эффективность в случае сложного состава солей, экологическая нагрузка
4	Совершенствование конструкции и режимов работы УЭЦН	Широкие возможности по реализации вариантов по совершенствованию конструкции и режимов работы УЭЦН	Дополнительные затраты на мониторинг и наземное оборудование
5	Методы предупреждения парафиноотложений	Повышение эффективности работы УЭЦН при использовании ряда технологических решений	Сложность подбора технологий применительно к составам парафинов
6	Использование методов воздействия на нефть электромагнитными полями	Сравнительная простота аппаратурных решений высокая производительность и значимости достигаемого эффекта.	Недостаточная теоретическая и практическая отработка

Анализ данных табл. 1.3 показывает, что каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, и области, где этот метод имеет возможности быть реализованным.

Магнитные технологии, как сравнительно новый метод, имеет широкие перспективы стать одним из наиболее эффективных [43].

1.4 Формирование целей и задач диссертационной работы

Цель работы - разработка комплексных решений повышения эффективности и работоспособности электроцентробежных насосов при эксплуатации в осложнённых условиях с использованием методов магнитного воздействия на добываемый флюид.

Задачи работы:

- Рассмотреть область применения магнитного поля при эксплуатации электроцентробежных насосов в осложненных условиях;
- Выполнить анализ теоретических предпосылок и экспериментальных исследований применения магнитной обработки для воздействия на нефти особых составов;
- Разработать нестандартную аппаратуру для проведения испытаний воздействия магнитного поля на осложненные флюиды;
- Провести экспериментальные исследования по воздействию магнитного поля на ОНФ-системы;
- Исследовать процессы формирования структурообразования в ОНФ-системах при магнитной обработке;
- Разработать технологические решения и рекомендации по использованию методов магнитной обработки добываемого флюида на нефтяных месторождениях.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1

1. Осложнения добычи могут проявляться либо изначально с периодом эксплуатации, либо возникать на определенных периодах эксплуатации, при этом на завершающих стадиях жизненного цикла осложнения неизбежны.
2. Состав осложнений как системная группа индивидуален по отношению к конкретному месторождению.

3. Воздействия осложнений на показатели работы электроцентробежных насосов способны вызвать резкое снижение их служебных свойств, однако механизмы влияния отдельных осложнений на узлы насосов пока еще остаются не прояснёнными.
4. Методы теории надежности сложных систем позволяют определить комплексные и элементные параметры работоспособности УЭЦН, а также рассчитать прогнозные характеристики надежности и разработать методы повышения работоспособности и надежности УЭЦН, однако указанные методы требуют выполнения большого объема экспериментальных исследования и проверки выполнимости исходных предпосылок.
5. Наиболее перспективными методами управления эффективностью работы электроцентробежных насосов при эксплуатации в осложнённых условиях представляются методы магнитного воздействия на флюиды.
6. Привлекательность метода магнитной обработки нефти состоит в сравнительной простоте аппаратурных решений, высокой производительности и значимости достигаемого эффекта.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПОСЫЛОК, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ НЕФТИ. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Анализ теоретических предпосылок и экспериментальных исследований применения магнитной обработки для воздействия на нефти

На фундаментальном уровне формулировка задачи влияния магнитного поля на нефти может быть описана как исследование взаимодействия магнитного поля и нефтяных флюидов в плане изменения структуры и характеристик нефтяных флюидов. Как было показано ранее (глава 1), осложненные нефтяные флюиды:

- гетерогенные по химическому и фазовому составу многокомпонентные системы, в которых присутствуют собственно нефти (смесь углеводородов различной молекулярной массы), а также указанные ниже компоненты - осложнения;
- водные системы различной минерализации, содержащие соли;
- минеральные дисперсные частицы (пески);
- высокомолекулярные органические включения (асфальто- смоло- парафиновые отложения и др.);
- газовые и другие компоненты.

По химическому и физико- химическому состоянию компоненты осложненных нефтяных флюидов разнообразны- истинные растворы (соли в воде), коллоидные системы, минеральные дисперсные системы, конденсированные углеводороды и иные варианты.

Более общая формулировка задачи - исследование взаимодействия магнитного поля с жидкой средой с целью установления способов

эффективного управления структурой, составом и гидродинамическими характеристиками жидкой среды.

Вопросы воздействия электромагнитного поля на сплошные среды рассмотрены в таких дисциплинах как электродинамика сплошных сред [44], гидродинамика [45] и в ряде других дисциплин.

Исследование природы воздействия электромагнитного поля на сплошные среды представляет собой сложную научную проблему.

Так, в [44] указано, что если проводящая жидкая среда находится в магнитном поле, то при ее гидродинамическом движении в ней возникают электрические поля и электрические токи. При этом на токи в магнитном поле действуют силы, оказывающие влияние на движение жидкости, а на само магнитное поле действуют токи. В результате формируются взаимообусловленные взаимодействия между магнитным полем и жидкой средой, что существенно усложняет понимание механизмов магнитного воздействия на жидкую среду.

Один из базовых вопросов природы воздействия магнитного поля и жидких сред состоит в уяснении механизмов рассеяния энергии магнитного поля в жидкой среде.

В [39] отмечено, что в отношении механизма магнитного воздействия на нефть, водонефтяные и водные системы нет единой общепринятой точки зрения. В монографии Классена В. И. [46] рассматриваются водные системы, тогда как для нефтедобычи характерны водные и водонефтяные системы.

Представляется целесообразным выделить исследуемые среды по уровню сложности состава и структуры:

- водные системы (истинные растворы) – простейшие однородные системы;
- водные коллоиды - двухуровневые системы (вода – коллоид), в которых присутствуют дефектные области - границы раздела вода – коллоид;

- многокомпонентные системы высшего уровня сложности - осложненные нефтяные флюиды (нефть с АСПО, минеральными солями, водонефтяными эмульсиями и др.).

Приведенная систематизация позволяет описывать среды как дефектные структуры:

- водные системы - условно однородные и бездефектные;
- водные коллоиды - неоднородные по плотности и составу, дефектность - границы раздела коллоидная частица - среда;
- осложненные нефтяные флюиды - высоконеоднородные по плотности и составу, дефектность - границы раздела частица - среда.

В дальнейшем (главы 3-4) принцип системного описания дефектности сред будет использован при исследовании механизма магнитного воздействия на нефтяные флюиды.

Водные системы

В [39] проанализированы гипотезы механизма воздействия магнитного поля на воду и водные системы, и выделены три из них:

- магнитное поле воздействует на ионы солей, что приводит к поляризации и деформации ионов, и росту вероятности их сближения, и образованию центров кристаллизации;
- магнитное поле воздействует на примеси воды, находящиеся в коллоидном состоянии;
- воздействие магнитного поля изменяет структуру воды.

Там же отмечено, что описанные гипотезы сложно применить для объяснения практически наблюдаемых полезных технических эффектов при магнитной обработке. Очень противоречивы и экспериментальные данные по изменению физических свойств воды и их зависимости от параметров воздействующего поля.

В [47] указано, что в результате обработки магнитным полем в водной системе увеличивается скорость химических реакций и кристаллизации растворенных веществ, интенсифицируются процессы адсорбции, ускоряется коагуляция примесей и выпадение их в осадок.

Водные системы - высокочувствительные структуры, на которые влияет большое число факторов: состав; концентрации компонентов; температура; давление и другие параметры.

В воде присутствуют надструктуры - ассоциаты - кластеры воды с размерами до $3,5 \div 30$ мкм [48].

Водно - коллоидные системы

Одной из наиболее изученных водно - коллоидных систем с точки зрения влияния на нее магнитного поля является вода с коллоидным железом [49,50].

В [49] описан механизм разрушения агрегатов из коллоидного железа.

Разрушение агрегата связывают с тем, что составляющие его частицы в магнитном поле приобретают одинаковую ориентацию вдоль поля и за счет сил отталкивания отдаляются друг от друга.

Магнитная обработка жидкостей давно и широко применяется для предотвращения выпадения окислов железа для повышения антикоррозионной устойчивости трубопроводов и котельного оборудования в водо- и теплоснабжении и многих других целей.

Обобщая ограниченный круг работ по водным и водно- коллоидным системам, можно отметить следующее:

- в системном плане представленные исследования сложно назвать полноценными, и можно рассматривать только как начальное приближение к пониманию механизмов воздействия магнитного поля на указанные системы;
- сами по себе водные и водно- коллоидные системы настолько разнообразны по составу и структуре [51-53], что необходимо при

выстраивании экспериментальных исследований сформировать четкое представление об объекте исследований, аппаратуре и методах магнитного воздействия, и задачах исследований;

- в случае неисполнения указанных требований будут иметь место невоспроизводимость результатов, и побочные ложные эффекты.

Осложненные нефтяные флюиды

Осложненные нефтяные флюиды (ОНФ) – наиболее сложные объекты для исследования, поскольку представляют собой сочетание разнородных по составу и структуре компонентов.

Ранее (глава 1) было показано, что к числу значимых осложнений при эксплуатации скважин с ЭЦН относятся солеотложения, пескопроявления, парафиноотложения и ряд других факторов.

В настоящем разделе будут рассмотрены не только указанные осложнения, но и более широкий их спектр, что вызвано рядом обстоятельств:

- имеющиеся достоверные источники ограничены, и не представляют указанный состав осложнений в достаточном виде;
- имеются перспективные исследования по таким осложнениям как водонефтяные эмульсии, что представляет интерес с точки зрения понимания физико- химических основ магнитной технологии.

Недостаточная проработка механизмов взаимодействия магнитного поля с относительно простыми (в сравнении с ОНФ) водными и водно-коллоидными системами существенно затрудняет интерпретацию эффектов взаимодействия магнитного поля с ОНФ - системами.

Вопросы влияния магнитного поля на ОНФ - системы рассмотрены в ряде работ [40,41,54-61, 108].

Ю.В. Лоскутова, Н.В. Юдина описывают нефть как нефтяную дисперсную систему со сложной внутренней организацией, способной изменяться под воздействием внешних факторов [40]. Показано, что с

помощью магнитных технологий можно воздействовать на физико-химические и структурно-реологические свойства нефтяной дисперсной системы, и в значительной степени разрушать структуры нефтяных ассоциатов, образованных смолисто-асфальтеновыми компонентами и кристаллическими парафиновыми углеводородами. В [54] проведено детальное исследование данных эффектов от воздействия магнитным полем.

На рис. 2.1 представлены графики зависимостей средних радиусов ассоциатов от времени, из которых видно, что магнитная обработка приводит к уменьшению их размеров.

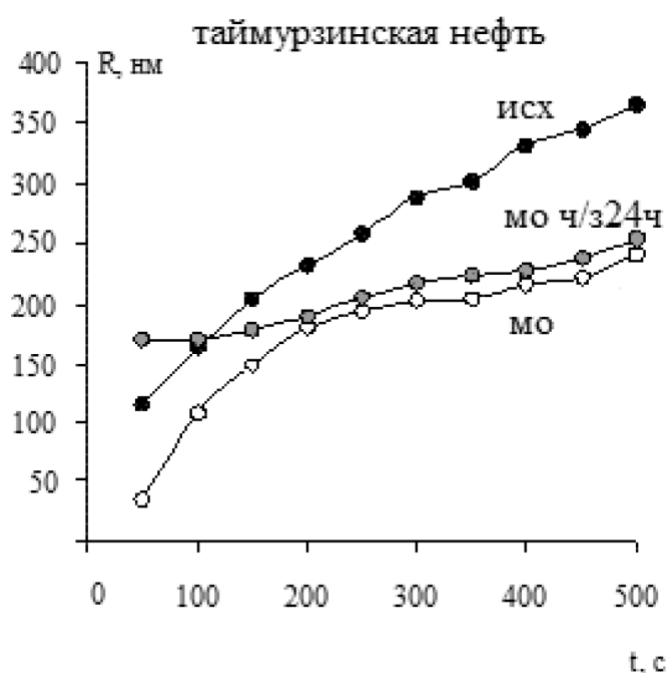


Рисунок 2.1 – Изменение во времени средних радиусов ассоциатов до и после магнитной обработки [54]

В [55] показано, что эффективность предупреждения конденсации нефтяного осадка с помощью магнитной обработки зависит от доли парафина, смол и асфальтенов в нефти. Так магнитное воздействие на высокопарафинистую, малосмолистую нефть Западно-Майского месторождения снижает содержание АСПО на 21,5 %, а в случае высокопарафинистой, смолистой нефти Арчинского месторождения – порядка 60 %, табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Влияние магнитной обработки на количество нефтяных отложений (ингибирующую способность) и температуру застывания высокопарафинистых нефтей [54]

Образец нефти	Ингибирующая способность, %	Температура застывания, °С
Высокопарафинистая нефть Западно-Майского м/р		
До магнитной обработки		+14,8
Магнитообработанная	21,5	+10,4
Высокопарафинистая высокосмолистая нефть Арчинского м/р		
До магнитной обработки		+7,2
Магнитообработанная	60,2	+4,3

В [56] представлены исследования по воздействию магнитного поля на предупреждение образования асфальто-смоло-парафинистых отложений в нефти.

Отмечено, что практическая реализация магнитной технологии в нефтедобыче непосредственно связана с тем, насколько развита теория о физико-химических механизмах воздействия магнитного поля на нефть. В силу этого, условия, при которых магнитное поле препятствует образованию твердых АСПО, до последнего времени оставались неясными.

В Казахстане опытным путем показана возможность эффективного использования магнитного поля для борьбы с АСПО на скважинах Южно-Тургайской группы месторождений. Применение магнитного депарафинизатора позволило в два раза увеличить межочистной период на месторождении Арыскуп.

В [57] метод магнитного воздействия применен в сочетании с ультразвуковыми колебаниями. Комплексное воздействие магнитного поля и ультразвуковых колебаний способствует более сильному уменьшению динамической вязкости высокопарафинистых нефтей, чем при отдельной обработке магнитным полем или ультразвуковыми колебаниями. Эффект снижения динамической вязкости под воздействием магнитного поля имеет устойчивый характер при разных температурах, рис. 2.2.

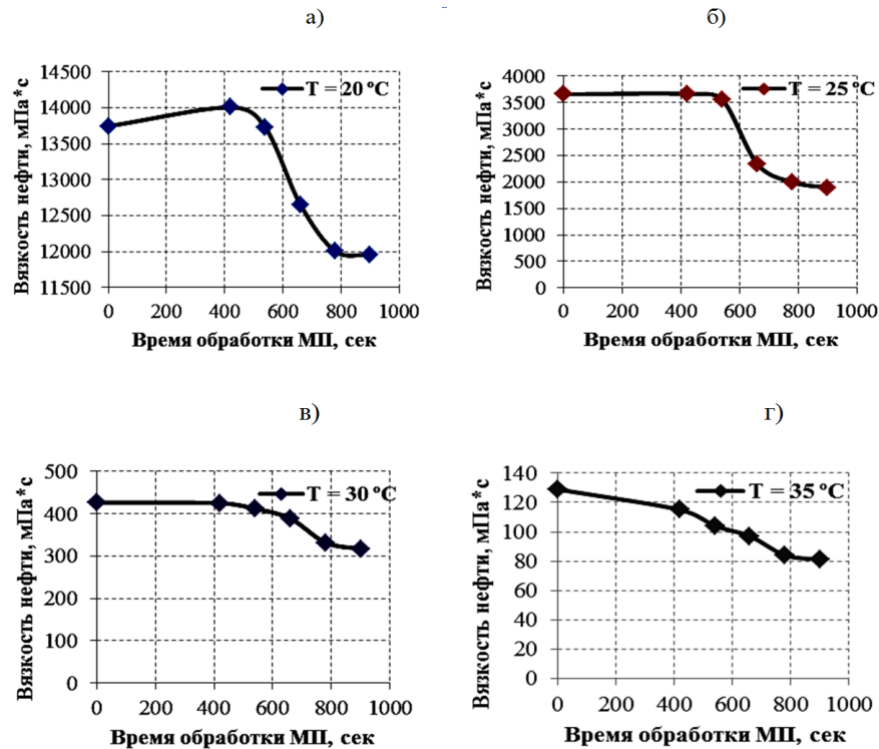


Рисунок 2.2 – Исследования изменения динамической вязкости Харьягинской нефти под воздействием магнитного поля [57]

Целесообразность комплексного воздействия магнитного поля и ультразвуковых колебаний показана в результате измерения времени релаксации высокопарафинистых нефтей под воздействием физических полей, рис. 2.3, из которого видно, что комплексное воздействие значительно увеличивает время восстановления первоначальных свойств аномальной нефти.

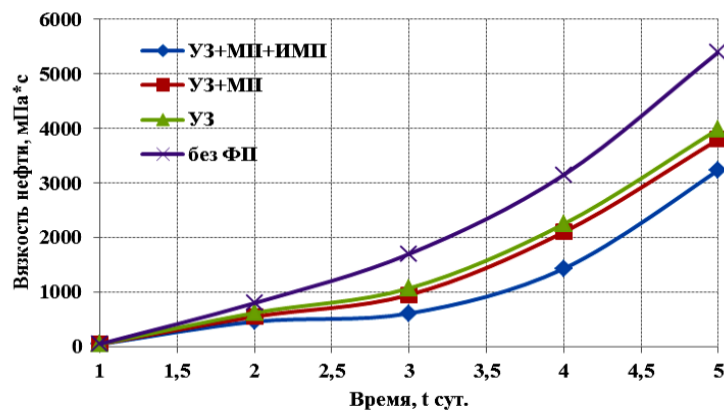


Рисунок 2.3 – Исследования изменения времени релаксации ВПН после воздействия физических полей [58]

Водонефтяные эмульсии

В [58] разделение водонефтяных эмульсий (ВНЭ) использовали обработку электромагнитным полем, с помощью которого можно ускорить процесс коагуляции частиц.

Отмечено, что широко применяемая в различных областях промышленности магнитная обработка до настоящего времени не имеет четкой общепринятой теоретической основы.

После изучения современного состояния и перспектив создания установки для деэмульсации нефти были проведены аналитические и экспериментальные исследования по гравитационной и электромагнитной деэмульсации, сопоставлены аналитические и экспериментальные данные. Для расчета скорости свободного осаждения частиц воды в нефти предложено соотношение:

$$w_0 = \frac{d^2(\rho_v - \rho_m)}{18\mu_m} \pi r^2 \quad (2.1)$$

, где w_0 – скорость свободного осаждения глобул воды в нефти; $\rho_v - \rho_m$ – разность плотностей воды и нефти; d – диаметр глобулы воды; μ_m – динамическая вязкость нефти.

Сопоставление теоретических и экспериментальных данных скорости свободного осаждения частиц воды в нефти W_0 указывает на хорошую сходимость данных, рис. 2.4.

Показано, что электромагнитный метод воздействия на ВУДС эффективнее гравитационного отстоя для модельной эмульсии от 30 до 300 %, причем эффективность метода растет с увеличением содержания воды в эмульсии, рис. 2.5.

В [108] выявлено снижение вязкости нефти и увеличение температуры насыщения ее парафином при воздействии магнитного поля. Лабораторные исследования по определению влияния на реологические свойства нефти показывают, что вязкость нефти уменьшается с ростом величины магнитной индукции.

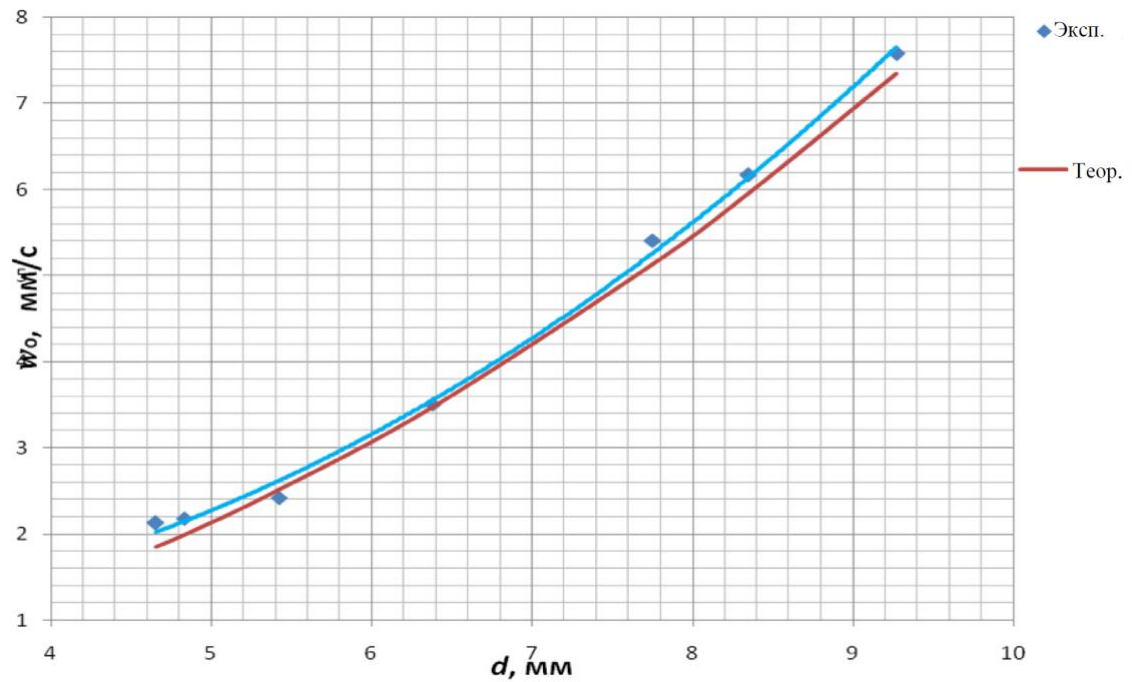


Рисунок 2.4 – Сопоставление теоретических и экспериментальных данных скорости свободного осаждения частиц воды в нефти [58]

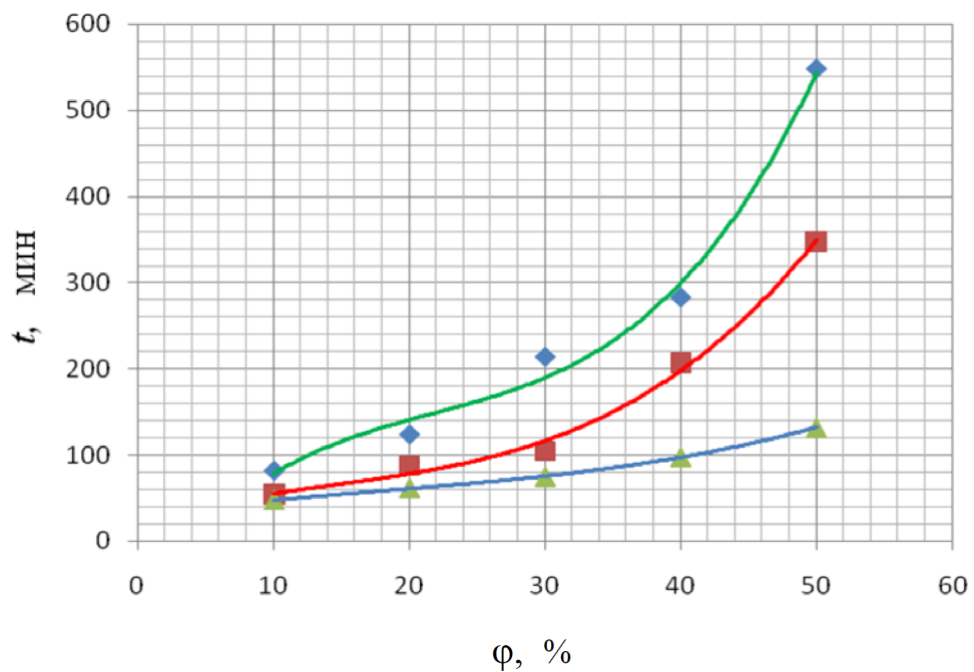


Рисунок 2.5 – Экспериментальные данные времени деэмульсации: верхняя кривая – гравитационный отстой при $t = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$; средняя кривая – гравитационный отстой при $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; нижняя кривая – деэмульсация под действием переменного магнитного поля [58]

В [59] выполнены лабораторные испытания остаточной обводненности нефтяного слоя в зависимости от магнитной обработки переменными и постоянными магнитными полями.

Остаточную обводненность определяли на водно-нефтяных эмульсиях месторождениях НГДУ «Уфанефть» (обводненность 15,6 %, вязкость 5400 сСт) и НГДУ «Чекмагушнефть» АНК «Башнефть» (обводненность 23,8 %, вязкость 1450 сСт.), табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты испытаний водонефтяной эмульсии в магнитном поле [59]

Водно-нефтяная эмульсия	Тип МО	Остаточная обводнённость нефти, %	Вязкость, сСт
1	2	3	4
НГДУ «Уфанефть»	1	4,6	4830
	2	4	4800
	3	7,2	4903
	4	6,6	4883
	5	5,8	4874
	6	5,9	4876
НГДУ «Чекмагушнефть»	1	4,2	985
	2	3,8	980
	3	6,6	1009
	4	6,7	1016
	5	6,9	1101
	6	6,7	1015

Как следует из табл. 2.2, применение магнитной технологии позволяет достичь определенного эффекта в деэмульсации нефти, при этом снижается содержание остаточной воды в нефтяной фазе и вязкость нефтяного слоя.

В [41] для деэмульгирования тяжелых высоковязких нефтей (вязкость более 30 мПа*с) Киенгопского месторождения использовали магнитную обработку нефти в сочетании с деэмульгатором.

В табл. 2.3 приведены результаты исследований по параметрам отделения воды из эмульсии, из которых видно, что, использование

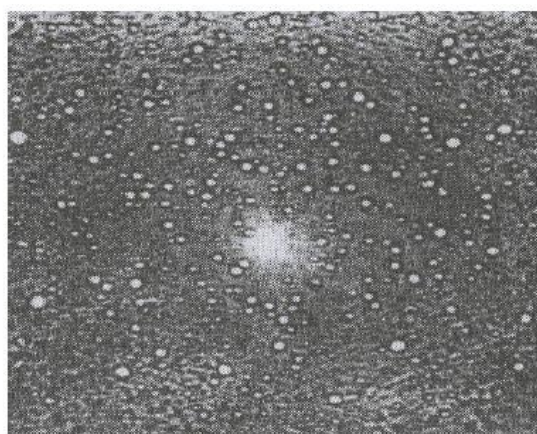
магнитного воздействия и химических реагентов при повышенных температурах позволяет существенно снизить остаточную обводнённость.

Таблица 2.3 – Параметры отделения воды из эмульсии за 120 минут отстоя при использовании магнитного воздействия и химических реагентов при повышенных температурах [41]

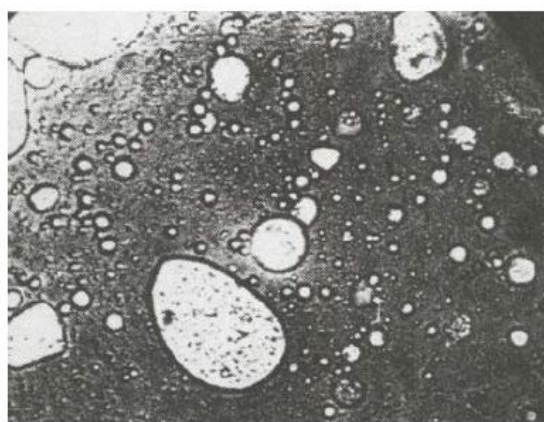
Реагент	Остаточная обводнённость за 120 минут статического отстоя, % (об.)			
	термохимия	магнитная обработка с частотой поля		
		20 Гц	25 Гц	30 Гц
Реапон-4В	10,8	20,5	13,4	36,7
СНПХ-4315Д	6,5	9,4	6,5	3,3
ИНТЕКС-720	10,8	9,4	9,4	6,5

В [60] предложена гипотеза относительно механизма воздействия магнитного поля на водонефтяные эмульсии. Допускается, что первоначально частицы эмульсии защищены оболочками, обеспечивающими устойчивость эмульсии.

Молекулы деэмульгатора закрепляются на поверхности эмульгированных частиц, а магнитное поле вызывает поляризацию и взаимное притяжение эмульгированных частиц, что приводит к значительному ускорению коагуляции и образованию крупных агломератов (рис. 2.6).



а)



б)

Рисунок 2.6 – Водонефтяная эмульсия до (а) и после (б) магнитной обработки [60]

Солеотложения

В [61] исследовали влияние магнитного поля на процессы отложения солей. Опыты выполняли на моделях пластовой воды, содержащих карбонат кальция. Показано, что обработка постоянным магнитным полем приводит к ускорению образования осадка (рис. 2.7).

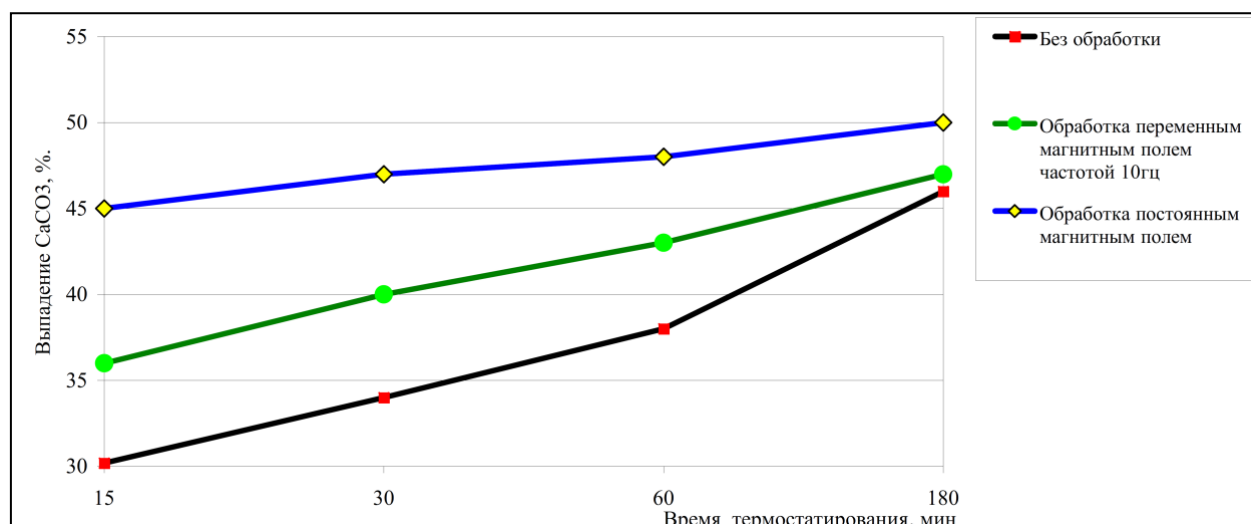


Рисунок 2.7 – Выпадение осадка из раствора, обработанного магнитным полем [61]

Обобщение данных настоящего раздела по теоретическим предпосылкам и экспериментальным исследованиям применения магнитной обработки для воздействия на жидкие среды в целом и на нефти в частности позволяет считать, что:

- в теоретическом плане вопросы механизмов воздействия магнитного поля на жидкие среды в целом и на нефти в частности остаются слабо проработанными, что в значительной степени препятствует выстраиванию системной методологии и технологии управления процессами модернизации состава и структуры осложненных нефтяных флюидов;
- в экспериментальном плане на лабораторном уровне при исследовании объектов ряда месторождений достигнут прогресс при работе с некоторыми осложнениями - солеотложения, водонефтяные

эмульсии, парафиноотложения, образованием смол и асфальтенов, а также по ряду других позиций;

- тем не менее, отдельные продвижения магнитной технологии пока еще не обеспечивают надежных воспроизводимых результатов в промышленных масштабах, что связано с нерешенностью теоретических и опытных исследований методического и технологического уровня.

Ключевая проблема магнитной технологии в отношении воздействия на нефти - слабая проработанность вопросов взаимосвязи между технологическими методами и объектом исследований, учитывая меру сложности его строения, состава и свойств [62]. Осложненные нефтяные флюиды - слишком сложный объект для прямого изучения методами магнитной технологии. Целесообразно, предваряя исследование сложного объекта, выполнить изучение более простых объектов - нефти без осложнений, осложняющих факторов как таковых, а также ряда искусственных объектов, а затем переходить к более сложным объектам.

Еще один принципиальный вопрос магнитной технологии - устойчивость наблюдаемых эффектов (разрушение водонефтяных эмульсий, предотвращение парафинообразования, снижение вязкости и др.) в параметрах времени и характеристик объекта и внешней среды. Можно ожидать, что система, перешедшая в новое качественное состояние в результате магнитного воздействия, после завершения этого воздействия будет с определенной скоростью релаксировать в направлении прежнего состояния, а значит, сам эффект должен постепенно пропадать.

Необходимо указать на отсутствие достоверных данных по использованию магнитных методов для управления процессами пескопроявлений как одного из наиболее значимых осложнений. Из этого не следует, что магнитные методы не подходят для решения проблемы негативного воздействия пескопроявлений на скважинное оборудование (на УЭЦН, в частности), но в то же время ставит указанную проблему в разряд

таких, которые требуют последовательного системного исследования, начиная от поисковой стадии, и далее к разработке технологии на различных уровнях - от лабораторной до промышленной.

2.2 Анализ аппаратуры магнитного воздействия на нефти

В настоящее время трудно говорить о наличии системных технологических решений магнитного воздействия на нефти, тем не менее, существуют отдельные подходы, которые представляют интерес [41,59,63-67].

В [63] приведена классификация магнитных аппаратов для обработки водных систем, рис. 2.8.



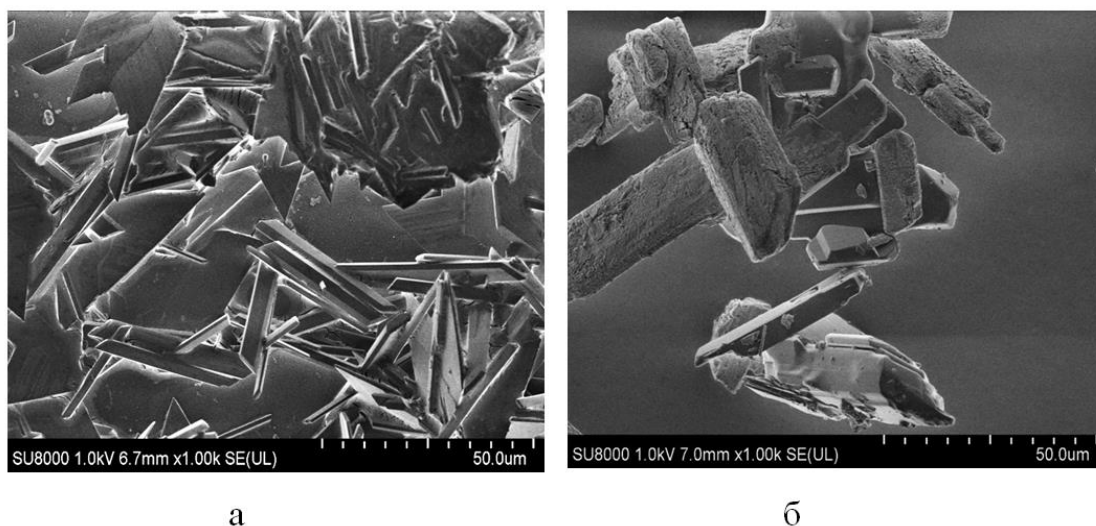
Рисунок 2.8 – Классификация магнитных аппаратов для обработки водных систем [63]

Как видно из приведенной классификации, существует широкое разнообразие вариантов аппаратного исполнения магнитной технологии.

Вместе с тем, надо отметить, что приведенная классификация имеет неполный характер, и может быть дополнена и усовершенствована.

В [64] представлены данные по управлению процессами солеотложения с использованием резонансно-волнового комплекса «Пилот-1».

В результате воздействия РВК «Пилот-1» происходит изменение морфологии кристаллов (рис. 2.9), и осаждение солей на ГНО не происходит.



а

б

Рисунок 2.9 – Морфология кристаллов солей: а - без использования РВК «Пилот-1» ; б - в результате воздействия РВК «Пилот-1» [64]

Опыт внедрения РВК «Пилот-1» на предприятии ООО «РН-Юганскнефтегаз», ОАО «Самаранефтегаз» показал, что помимо снижения солеотложения наблюдается благоприятный эффект воздействия на скважинную жидкость - снижение вязкости водонефтяной эмульсии, обеспечивая более лёгкий подъем жидкости.

На рис. 2.10 представлен данный комплекс, использование данного оборудования в компоновке с УЭЦН предполагает крепление к основанию ПЭД. Апробация данной технологии проведена на месторождениях ОАО

«НК «Роснефть», АНК «Башнефть» и ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», в ряде случаев получены положительные результаты.

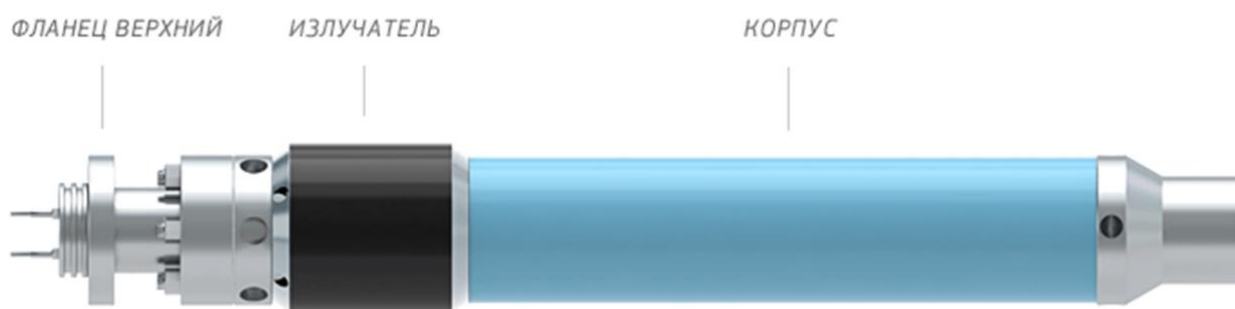


Рисунок 2.10 – Резонансно-волновой комплекс «Пилот-1» [64]

С использованием РВК «Пилот-1» средняя наработка ГНО в испытываемых скважинах ОАО «НК «Роснефть» увеличилась с 79 до 229 суток [65]. За счет отсутствия солеотложений в ОАО АНК «Башнефть» также наблюдалось увеличение средней наработки на отказ. По результатам испытаний было принято решение о промышленном внедрении РВК «Пилот-1».

В [59] представлено устройство для предотвращения отложений в нефтяных флюидах парафина и неорганических солей с использованием электромагнитного поля (рис. 2.11).

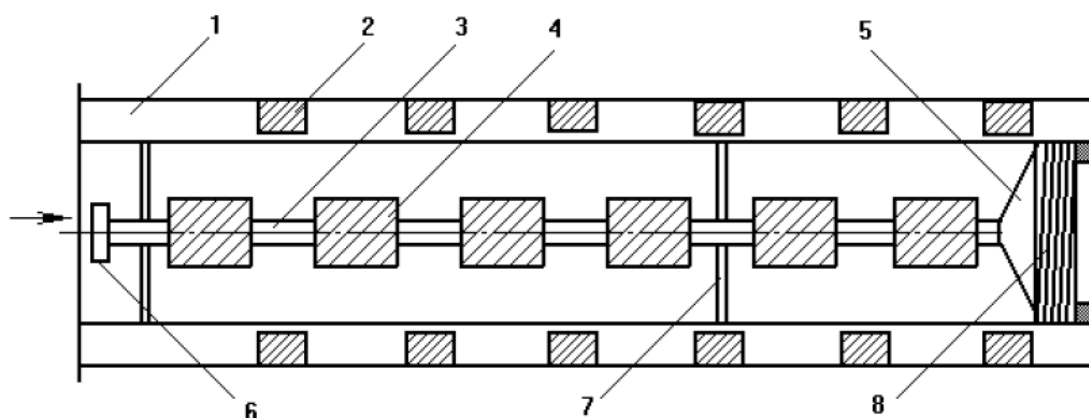


Рисунок 2.11 – Электромагнитное устройство для обработки жидкости [59]: 1 - цилиндрический корпус из диамагнитного материала, 2 - кольцевая магнитная система, 3 - сердечник, размещенный в корпусе

устройства; 4 - магнитные стержни, 5 - втулка; 6 - силовой напорный диск, 8 – пружина

В описанном устройстве имеется возможность регулирования таких параметров как напряженность электромагнитного поля и время нахождения нефтяных флюидов в электромагнитном поле, что позволяет гибко подбирать эффективные воздействия применительно к особенностям системы.

Лаптев А. Б. [66] предложил методологию создания агрегатов расчета и конструирования агрегатов для магнитогидродинамической обработки промысловых сред с целью снижения солеотложения и АСПО в нефтепромысловом оборудовании. Эффективность подавления солеотложения определяется величиной магнитной индукции, скоростью потока среды через аппарат и концентрацией ионов солей жесткости.

Схема агрегата магнитогидродинамической обработки для подавления коррозии приведена на рис. 2.12. В поперечном сечении трубопровода установлены перегородки с вмонтированными в них постоянными точечными магнитами. На соседних перегородках магниты обращены разноименными полюсами друг к другу.

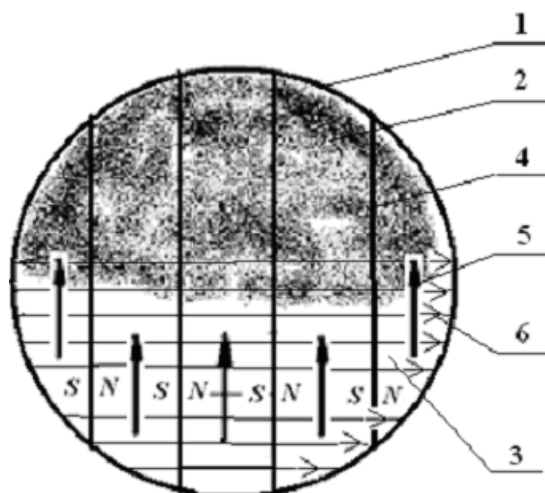


Рисунок 2.12 – Схема устройства для МГДО промысловых сред [66]:
1 – корпус; 2 - нефтяная фаза; 3 - водная фаза; 4 - вертикальные

перегородки с ИМП; 5 – направление индуцированного электрического тока; 6 – векторы магнитной индукции

Описанное устройство позволяет снизить концентрацию коррозионно-активного иона гидроксония на два порядка. Данный способ является физическим способом воздействия на коррозионно-активную среду, так как при электрохимической коррозии, как известно, окислителями могут быть растворенный в электролите кислород или ионы гидроксония, соответственно целесообразным оказывается снижение концентрации ионов гидроксония.

В качестве примера опытно- промышленной установки для обработки водонефтяных эмульсий можно привести устройство УМП-159-006, созданное по заданию НГДУ "Уфанефть», включающее блок управления и внешний индуктор с сердечником [41]. Поток жидкости обрабатывается переменным магнитным полем, направленным поперек потока (рис. 2.13).



а)



б)

Рисунок 2.13 – Электромагнитная установка УМП-159-006: а) блок управления; б) индуктор установки [41]

Представленная установка показала эффективность на месторождениях.

В рамках исследовательских работ [61] была сконструирована установка для магнитной обработки жидкости (рис. 2.14) с целью снижения солеотложений в скважинах эксплуатируемых УЭЦН. При проведении опытно-промысловых испытаний данной установки в ООО «РН-Юганскнефтегаз» на ряде скважин получены положительные эффекты.

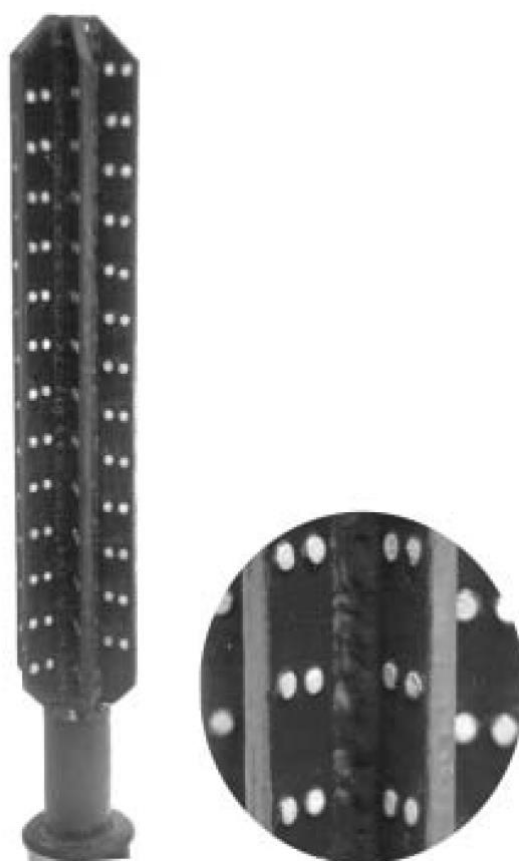


Рисунок 2.14 – Установка магнитной обработки скважинной жидкости [61]

В [67] отмечено, что в добываемом продукте почти всегда очень много ферромагнетиков – веществ с большим магнитным моментом, которые оказывают значительное влияние на магнитные взаимодействия.

На рис. 2.15 показаны кривые намагничивания отложений на МИОН, установленном на глубине около 900 м (1) и 2000 м (2).

В самом продукте концентрация ферромагнетиков достаточна, чтобы в магнитном поле индуктора имела место конденсация компонентов АСПО.



Рисунок 2.15 – Кривые намагничивания отложений на МИОН, установленном на глубине около 900 м (1) и 2000 м (2) [67]

Принципиальное отличие устройства «МАУТ» от других магнитных активаторов состоит в конструкции корпуса и непосредственно самой магнитной системы.

В [55] показано, что использование устройства «МАУТ» для магнитной обработки парафинистых и высокопарафинистых нефтей с различным содержанием парафинов, смол и асфальтенов приводит к снижению количества образующегося нефтяного осадка и температуры застывания, предельного напряжения сдвига и вязкости нефти.

Анализ известных аппаратурных подходов магнитного воздействия на нефти показывает, что представленные решения имеют единичный характер, и при этом слабо оформлены системные технологические принципы. Аппаратурные решения представляют собой материальное воплощение научных и технологических разработок определённой задачи, как, например, управление ОНФ - системами. В условиях нерешённости научных основ возникают сложности при выстраивании системной технологии, и, в том числе, аппаратурных решений.

2.3 Характеристика объекта и постановка задачи экспериментальных исследований

В настоящей работе объектами исследований служат несколько сущностей разного качества и масштаба:

- воображаемые объекты, применяемые при моделировании и теоретических исследованиях;
- искусственные объекты,готавливаемые при лабораторных и стендовых испытаниях;
- реальные объекты - месторождения, используемые при выполнении опытных работ и предлагаемые для опробования.

Принципы выбора объектов исследований (месторождений)

Критерии выбора объектов исследования - месторождений:

- **значимость и масштабность** объектов ООО «РН-Юганскнефтегаз» обеспечивает широкие возможности анализа осложнений со сложившейся структурой, а объект ОАО «Тюменнефтегаз» как находящееся на начальном этапе разработки месторождение с трудноизвлекаемыми запасами; объекты ООО «РН-Юганскнефтегаз» обеспечивают 80 % добычи нефти дочернего общества, что в разрезе Компании составляет практически $\frac{1}{4}$ часть от всей годовой добычи; объект ОАО «Тюменнефтегаз» - стратегический для Компании в части обеспечения добычи с 2017 года с целью компенсации падения добычи нефти на истощаемых месторождениях;
- **доступ к базам данных объектов** в части геолого-промысловой информации, технической и проектной документации;
- **значимость объектов** - данные активы являются стратегическими для Компании по объёмам добычи нефти;

- **широкое представительство** по парку УЭЦН - по ООО «РН-Юганскнефтегаз» парк УЭЦН составлял на конец 2014 года 9 764 установки это порядка 28% от общего парка Компании - 34 517 шт.;
- **полнота и значимость осложнений** при эксплуатации УЭЦН:
 - Солеотложения;
 - Механические примеси;
 - АСПО.
- **представительство и сходство объектов** - ООО «РН-Юганскнефтегаз» схоже с большинством месторождений Западной Сибири, а объект ОАО «Тюменнефтегаз» - с месторождениями с трудно извлекаемыми запасами в ЯНАО, как наиболее перспективной области нефтегазодобычи в ближайшей преспективе, что позволяет расширить область практической направленности работы до крупных промышленных регионов и открывает возможность разработки рекомендаций к вновь разрабатываемым месторождениям Заполярья.

Для исследования выбраны объекты - месторождения:

1. Приобское месторождение ООО «РН-Юганскнефтегаз»
2. Приразломное месторождение ООО «РН-Юганскнефтегаз»
3. Мамонтовское месторождение ООО «РН-Юганскнефтегаз»
4. Малобалыкское месторождение ООО «РН-Юганскнефтегаз»
5. Русское месторождение ОАО «Тюменнефтегаз»

Указанные месторождения разрабатываются дочерними обществами на территории деятельности ОАО «НК «Роснефть». В табл. 2.4 приведены основные характеристики объектов - месторождений.

Таблица 2.4 – Основные характеристики объектов – месторождений

№ п/п	Месторождение	Год ввода	Объект	Парк УЭЦН, шт	Доля добычи на парк УЭЦН, %	Осложнения при эксплуатации УЭЦН
1	Приобское	1989	АС ₁₀ , АС ₁₁ , АС ₁₂	2816	100	Соли Мех примеси АСПО
2	Приразломное	1986	БС ₄₋₅ , Ач ₅	1287	100	Соли Мех примеси АСПО
3	Мамонтовское	1968	АС ₄ , АС ₅₊₆ , БС ₆ , БС ₈ , БС ₁₀ ^{МОН} , БС ₁₀ ^{ТСП} , БС ₁₁ , ЮС ₂₁ , ЮС ₂₃	1231	100	Соли Мех примеси
4	Малобалыкское	1984	Ач ₁₋₃ , АС ₄₋₆ АС ₇₋₈ ЮС ₀ , ЮС ₂	1406	100	Соли Мех примеси
5	Русское	2017	ПК ₁₋₇	13*	100	Мех. примеси

**при выходе на проектные уровни добычи на Русском месторождении общий фонд скважин оборудованных УЭЦН планируется обеспечить в количестве 365 скважин*

Принципы построения системной технологии управления ОНФ - системами

Как было показано выше, магнитная технология имеет хорошие перспективы для использования в методах управления ОНФ - системами, однако до настоящего времени указанная технология не вышла за пределы отдельных примеров эффективного использования. В единичных случаях удается добиться гармонии между используемым оборудованием, технологическими параметрами магнитного воздействия и характеристиками нефтяной системы. Для качественного продвижения и создания системной технологии необходимо разработать и внедрить методологию системных решений, позволяющую установить взаимосвязи между базовыми элементами системной технологии - научными предпосылками технологии, методами проверки достоверности научных гипотез, способами воздействия на нефтяные среды и их совокупными характеристиками.

Принципы построения системной технологии применительно к такому распространенному осложнению как пескопроявление могут быть изложены в виде:

- разработка гипотез механизмов магнитного воздействия на нефти с дисперсной фазой (признак пескопроявления);
- выполнение исследований по проверке гипотез с использованием экспериментальных исследований при помощи разработанной аппаратуры;
- разработка принципов устойчивости (воспроизводимости) технологии на основе установления системных связей между параметрами воздействия и характеристиками среды;
- разработка технологических решений и рекомендаций по использованию магнитного воздействия на нефти с дисперсной фазой;
- опробование разработанной технологии в условиях месторождений.

Приведенный алгоритм будет использован и при работе с иными осложнениями.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

1. Ключевая проблема магнитной технологии в отношении воздействия на нефти - слабая проработанность вопросов взаимосвязи между технологическими методами и объектом исследований, учитывая меру сложности его строения, состава и свойств.
2. Анализ теоретических предпосылок и экспериментальных исследования применения магнитной обработки для воздействия на жидкие среды и на нефти в частности показывает, что в экспериментальном плане на лабораторном уровне и на ряде месторождениях достигнуты эффекты, в то время как отдельные продвижения магнитной технологии пока еще не обеспечивают надежных воспроизводимых результатов в промышленных масштабах, что связано с нерешенностью теоретических и опытных исследований методического и технологического уровня.
3. Анализ известных аппаратурных подходов магнитного воздействия на нефти показывает, что представленные решения имеют единичный характер, и при этом слабо оформлены системные технологические принципы.
4. Предложены принципы выбора и определен состав объектов дальнейших исследований (месторождений).
5. Предложены принципы построения системной технологии управления ОНФ - системами которые рассматриваются в данной работе.
6. Обоснованы принципы выбора и определен состав объектов исследований (месторождений).

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОНФ-СИСТЕМЫ

3.1 Принципы методологии и выбор аппаратурных решений лабораторных испытаний ОНФ-систем в условиях воздействия магнитного поля

Ранее (глава 2) было показано, что к числу наиболее значимых осложнений месторождений - объектов исследований, отрицательно влияющих на эффективность эксплуатации УЭЦН, относятся механические примеси (дисперсная минеральная фаза), АСПО и солеотложения.

Кроме того, было показано, что в соответствии с принципами построения системной устойчивой технологии необходимо сформировать представления о механизмах магнитного воздействия на нефти с осложнениями.

Методологию проведения лабораторных испытаний ОНФ - систем в условиях воздействия магнитного поля составляют:

- принципы и схемы воспроизведения реальных ОНФ - систем в состоянии идентичном условиям промышленной выработки (динамика флюидов, их состав и др.);
- аппаратурные и технологические решения нестандартного оборудования (лабораторных установок) для исследования магнитного воздействия на ОНФ - системы;
- методы приготовления искусственных и отбора натуральных образцов ОНФ - систем по принципам системного подхода к изучению сложных объектов;
- методы и технологии выполнения лабораторных испытаний ОНФ - систем с использованием нестандартного оборудования и искусственных образцов ОНФ - систем;

- методы анализа и обработки результатов лабораторных испытаний ОНФ - систем.

Таким образом, методология проведения лабораторных испытаний ОНФ - систем представляет собой системную группу, состоящую из идеологии испытаний, принципов и методов воспроизведения динамических ОНФ - систем, аппаратурных решений, технологий приготовления искусственных образцов ОНФ - систем и интерпретаций результатов исследований.

Принципы и схемы воспроизведения реальных ОНФ - систем в состоянии идентичном условиям промышленной выработке строятся на том, что воздействия осложнений на УЭЦН имеет определённые динамические параметры – скорость движения флюида, время контакта флюида с осложнениями с колесом, а также ряд производных характеристик – кинетическая энергия частиц флюида при ударе по колесу и др.

Чем выше скорость движения флюида через магнитное поле, тем меньше время контакта флюида с магнитным полем, и тем выше должна быть эффективность магнитной обработки, чтобы добиться заметного результата.

Эффективность магнитной обработки - показатель, характеризующий степень достижения результата магнитного воздействия, может быть выражен как качественными, так и количественными оценками.

В зависимости от уровня и масштабов исследований - лабораторный, опытный или промышленный уровень - могут быть использованы разные способы оценки эффективности. Значимый уровень оценки эффективности магнитной обработки – при промышленном применении метода.

Поскольку осложнения индивидуальны по своей природе, то в отношении каждого осложнения на этапе лабораторных и опытных исследований могут быть применены адаптированные по виду осложнения способы оценки эффективности.

Один из перспективных подходов состоит в использовании энергетической модели взаимодействия магнитного поля с веществом, согласно которой при взаимодействии магнитного поля происходит рассеяние (диссипация) энергии поля. Всю энергию можно разделить на две части- полезную и остальную.

Полезная энергия тратится на совершение необходимой работы, например, на разупрочнение агрегатов минеральных частиц. Чем больше доля полезной энергии, тем выше эффективность метода в отношении данного осложнения.

Аппаратурно-технологические решения при выборе схемы лабораторной установки

В литературе описаны несколько вариантов лабораторных установок для исследования магнитного воздействия на нефти. Из числа указанных установок будут рассмотрены некоторые типы аппаратов, предназначенных для управления характеристиками нефтяных систем, а затем отобраны те типы аппаратов, которые отвечают следующим критериям:

- возможность испытания ОНФ - систем с такими осложнениями, как, механические примеси, АСПО и солеотложения;
- возможность контроля достаточного числа технологических параметров;
- простота и надежность аппаратуры.

В [66] при решении задачи предотвращения отложения солей использовали магнитогидродинамическую обработку модельных или промысловых сред в лабораторных условиях, для чего изготовили установку обработки неподвижной среды вращающимися источниками магнитного поля, рис. 3.1.

Состав установки: 1- корпус из диамагнитного материала, 2 -источник магнитного поля, расположенные на дисках - 3, установленные вдоль корпуса на вращающихся валах - 4. Установка позволяет проводить обработку среды магнитным полем; создавать в среде градиент

концентрации ионов солей под воздействием индуцируемого электрического поля, а также варьировать величины индукции.

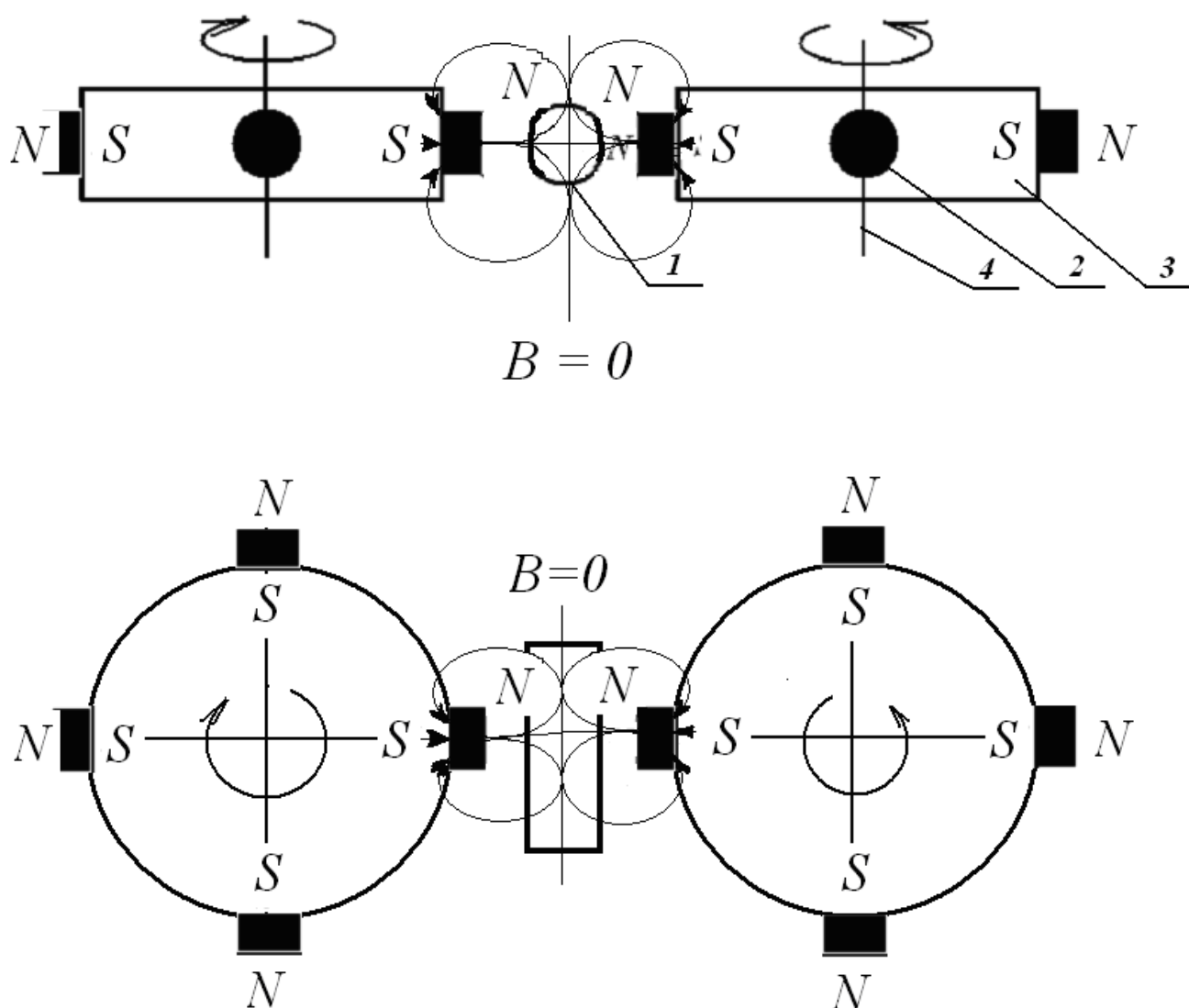


Рисунок 3.1 – Схема устройства для проведения магнитогидродинамической обработки модельных и промышленных сред [66]

Принцип магнитогидродинамического метода состоял в создании условий повышения эффективности снижения солеотложений за счет сочетания магнитного (магнитное поле напряженностью 80 кА/м) и гидродинамического воздействия.

Оценка эффективности магнитогидродинамической обработки осуществлялась с помощью оптического микроскопа МБС-9 визуальным

наблюдением процесса кристаллизации солей жесткости, выпадавших из отфильтрованного раствора.

В [68] для экспериментального исследования электромагнитного воздействия на нефтенасыщенный коллектор изготовили лабораторную установку, позволяющую создавать электромагнитное поле частотой 1094 кГц, максимальная сила тока – 27 А, рис. 3.2.

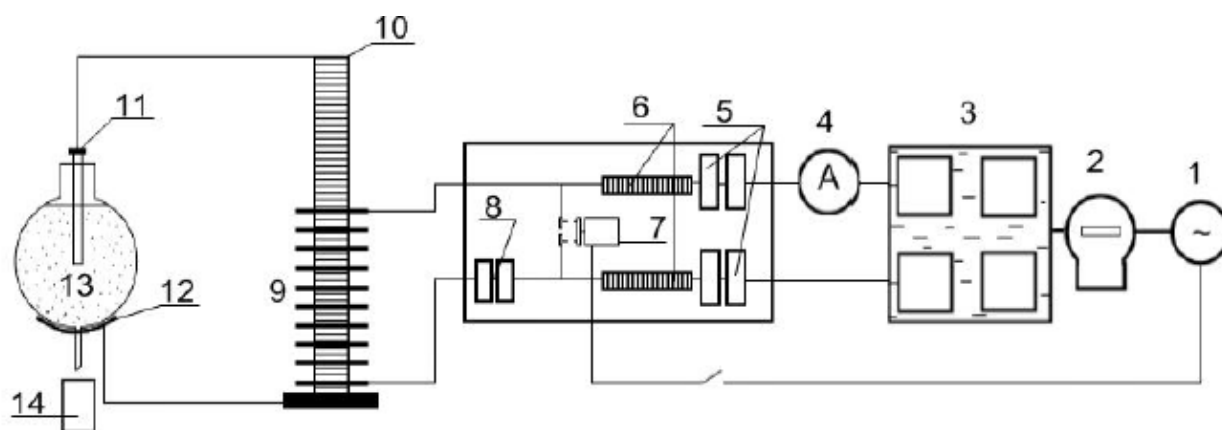


Рисунок 3.2 – Схема лабораторной установки [68]: 1 – источник переменного тока (50 Гц, 220 В), 2 – счетчик электрической энергии, 3 – емкость с повышающими микроволновыми трансформаторами, погруженными в моторное масло, 4 – амперметр, 5 – высоковольтные конденсаторы Сараситор, 6 – катушки фильтров ВЧ, 7 – динамический разрядник, 8 – батарея конденсаторов К-75-25 первичного контура, 9 – первичная катушка, 10 – вторичная катушка, 11 – электрод, погруженный в модель керна, 12 – медная пластинная, 13 – стеклянная колба, 14 – мерная колба

Принцип, заложенный в схему установки, давал возможность сочетать действие электрического и электромагнитного полей.

Установка позволяла изучать влияние высокочастотного электромагнитного поля на физическую модель керна и исследовать подвижность нефти в коллекторе, что представляет интерес при изучении ОНФ - систем.

В [58] для разделения водонефтяных эмульсий применили лабораторную установку (рис. 3.3), в которой воздействие электромагнитным полем сочеталось с тепловым. Установка состоит из емкости с эмульсией; автотрансформатора; статора от электромотора, создающего переменное магнитное поле в эмульсации; каркаса, на который крепятся делительная воронка и статор.



Рисунок 3.3 – Лабораторная установка демульсации водонефтяных эмульсий воздействием переменного магнитного поля [58]

Принцип проведения эксперимента на данной установке состоял в усилении эффективности магнитного поля тепловым воздействием, что

обеспечивало комплексный взаимодополняющий результат. Тепловое воздействие приводит к усилению трансляционного движения молекул, что создает предпосылки для дезэмульсизации среды.

В [61] для исследования воздействия магнитного поля на солеотложение использовали стенд при длительных периодах контакта (до нескольких сотен с.), рис. 3.4. При данных исследованиях модели пластовой воды обрабатывались магнитным полем и термостатировались в течении 0,5-3 часов. Напряженность постоянного магнитного поля составляла 32 кА/м.

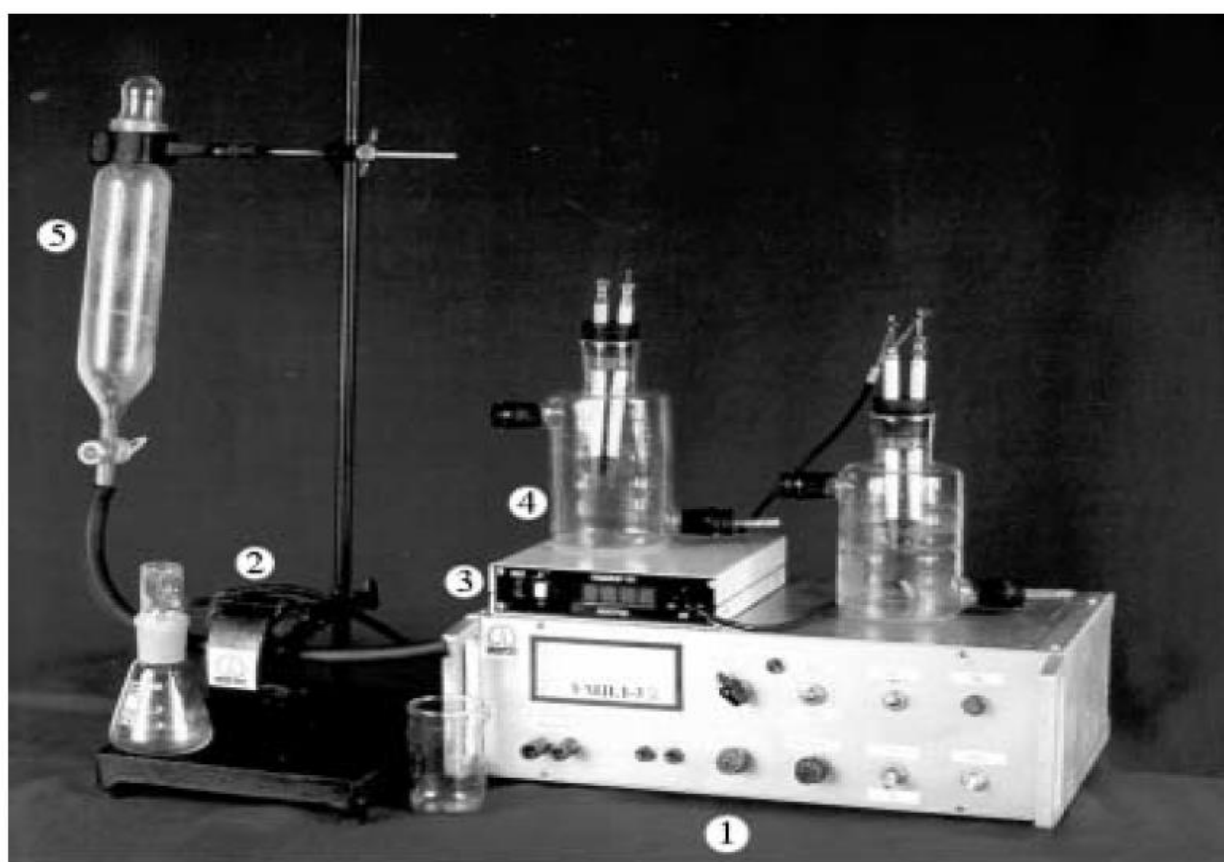


Рисунок 3.4 – Стенд магнитной обработки жидкости с использованием установки [61]: 1- установка УМПЛ-1; 2- индуктор; 3- коррозиметр; 4- электрохимическая ячейка; 5- делительная воронка

Установка УМПЛ-1 построена на принципе оптимизации параметров магнитной обработки в системе характеристик: напряженность магнитного

поля - время обработки – температура - время термостатирования - способы обработки водной среды.

В [38] для исследования влияния магнитных и электромагнитных полей на отложения парафина использовали лабораторную установку, рис. 3.5.

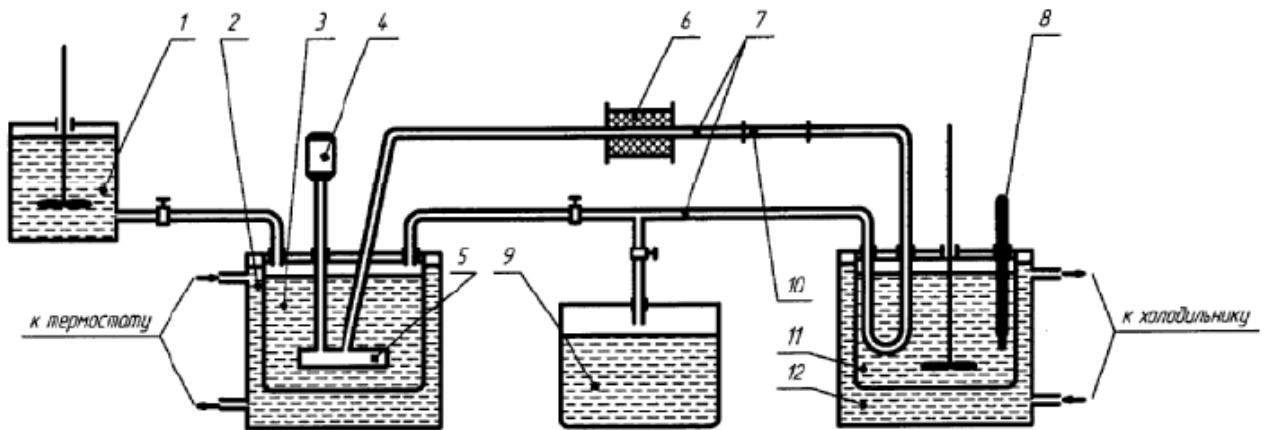


Рисунок 3.5 – Лабораторная установка для изучения влияния магнитных и электромагнитных полей на интенсивность отложения парафина [38]: 1 – емкость для нефти; 2 – термостат; 3 – термостатируемый сосуд; 4 – электродвигатель; 5 – насос; 6 – катушка индуктивности (постоянный магнит); 7 – система трубок; 8 – термометр; 9 – сливная емкость; 10 – индикатор отложений; 11 – охлаждаемый сосуд; 12 – холодильник

Испытуемый объем нефти при различных температурах прокачивали по системе трубок 7 через магнитное (электромагнитное) поле, создаваемое постоянным или переменным магнитом (электромагнитом) 6 через индикаторную трубку 10, с целью определения интенсивности отложения парафинов. Напряженность поля во время опытов составляла 0; 14, 28, 42, 56 кА/м.

Контролируемые параметры: время и скорость прокачки нефти, температура, напряженность электромагнитного (магнитного) поля.

В [69] при разработке магнитной установки для разделения нефтяных эмульсий исходили из целесообразности комбинирования магнитного воздействия с механоактивацией нефтяных эмульсий – процессом изменения

энергетического состояния, физического строения и химических свойств веществ под действием механических сил при диспергировании. Эту энергию с успехом можно использовать для увеличения эффективности последующих технологических процессов. Для реализации принципа комбинированного воздействия использовали более сложную в сравнении с приведенными выше установку - экспериментальный стенд, рис. 3.6.

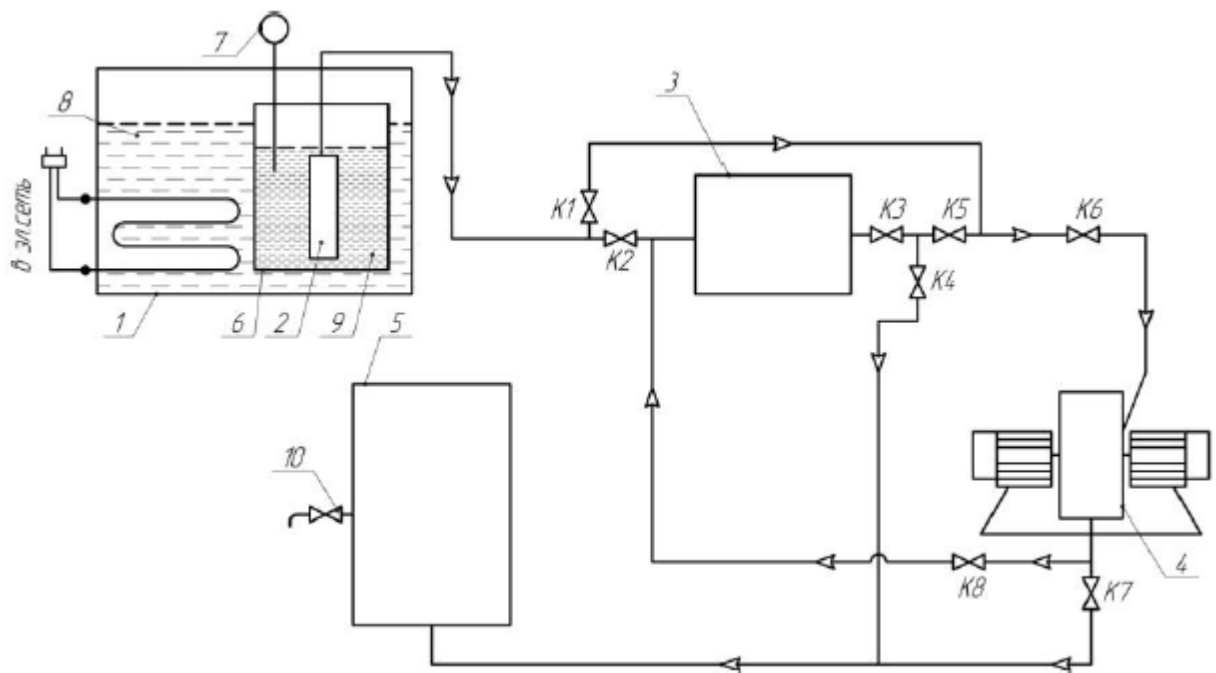


Рисунок 3.6 – Схема экспериментального стенда [69]: 1 – нагреватель; 2 – центробежный насос; 3 – аппарат магнитной обработки; 4 – дезинтегратор; 5 – отстойник; 6 – буферная емкость; 7 – датчик температуры; 8 – рабочий агент (вода); 9 – нефтяная эмульсия; 10 – пробоотборник; K1...K2 – краны шаровые (Рy16 Ду15)

В [54] экспериментальные исследования влияния магнитного поля на структурно-реологические свойства нефти проводились на лабораторной установке. Проточная лабораторная установка состояла из бюретки, куда помещали испытуемый образец, и далее по тefлоновой трубке пропускали через магнитоактиватор на основе сплавов редкоземельных металлов Nd-Fe-B обеспечивающих амплитуду магнитной индукции 0.6-0.8 Тл.

Таким образом, на основании рассмотрения представленных лабораторных установок и стенда можно отметить, что используются как простые магнитные схемы, так и комбинированные методы. Следует указать на широкое разнообразие применяемых аппаратурных схем. В то же время данные по эффективности описанных установок в плане возможности достижения цели исследования в примененной аппаратурной схеме представлены в ограниченном объеме.

Из числа описанных лабораторных систем установленным критериям отвечает блок-схема, представленная на рис. 3.5.

На основе приведенной схемы нами была сконструирована и смонтирована лабораторная установка вариативного типа, адаптированная под задачи, решаемые в настоящей работе, рис. 3.7.

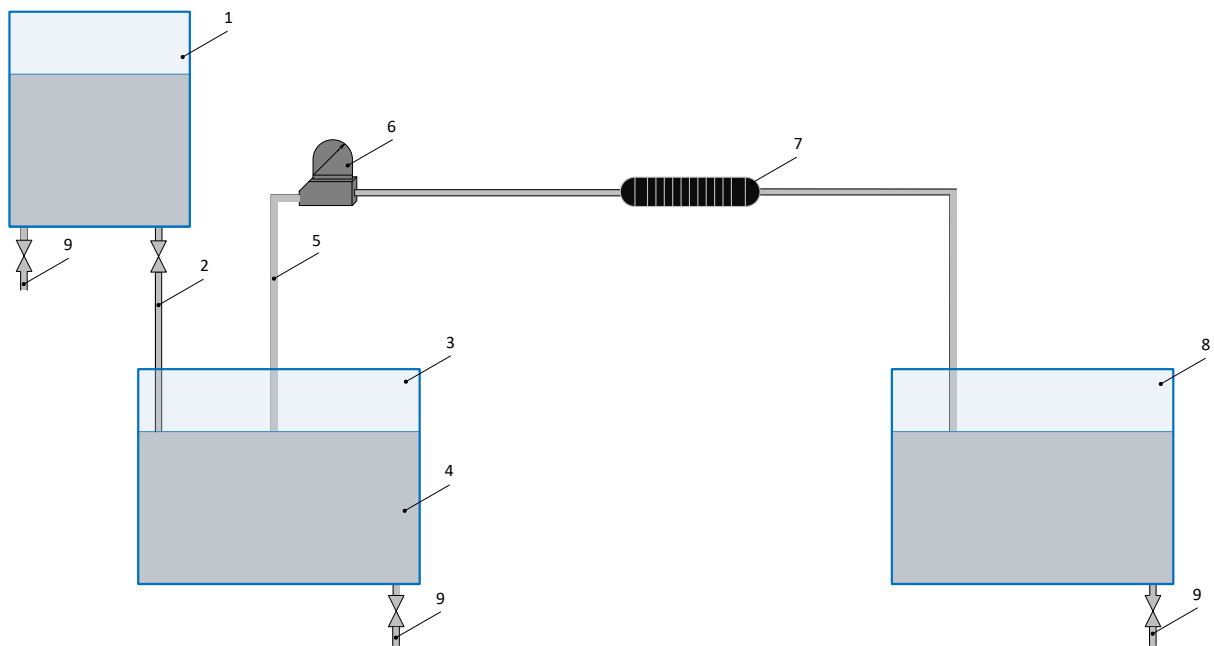


Рисунок 3.7 – Блок - схема установки для проведения испытаний магнитного воздействия на ОНФ- системы: 1 – сосуд для приготовления исследуемого образца; 2 – линия для подачи исследуемого образца в сосуд 3; 3 – сосуд для исследуемого образца; 4 – исследуемый образец; 5 – линия для транспортировки образца через магнитный элемент; 6 – насос; 7 – магнитный элемент; 8 – сосуд для обработанного образца; 9 – линия для отбора образца из сосуда

Для создания воздействия магнитным полем применяли магнитный элемент на основе сплавов редкоземельных металлов Nd-Fe-B (неодим-железо-бор).

В качестве насоса использовали химический насос для перекачки жидкостей Wilo, модель PM-250 PES с частотным регулятором для создания производительности в диапазоне $0.1 \div 1.5$ (л/мин.).

На рис. 3.8 представлена собранная нами установка в реальных лабораторных условиях, на которой проводились лабораторные исследования.

При выполнении исследований влияния магнитного поля на ОНФ-системы применяли дополнительное оборудование и приборы для регистрации, контроля и определения параметров наблюдаемых результатов.

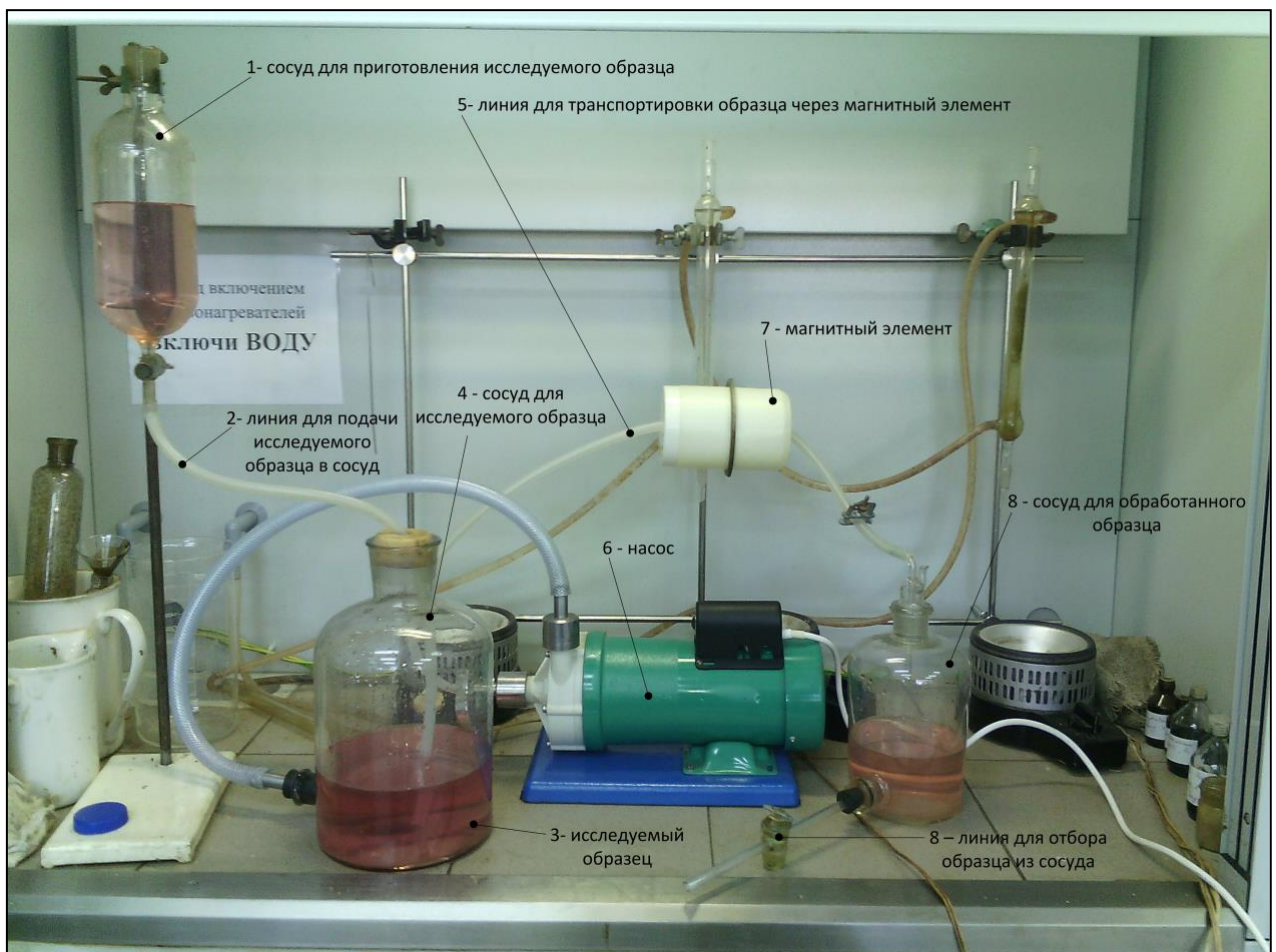


Рисунок 3.8 – Лабораторная установка для проведения испытаний магнитного воздействия на ОНФ - системы

3.2 Методы лабораторных исследований ОНФ - систем

3.2.1 Методология приготовления и отбора образцов для исследования

Испытания ОНФ - систем в условиях магнитного воздействия проводили в два этапа:

- на модельных образцах, имитирующих виды осложнений: солеотложение, АСПО и пескопроявление (присутствие во флюиде дисперсной минеральной фазы);
- на реальных объектах исследования, представляющих группу месторождений, описанных в главе 2.

Такой способ имеет свое обоснование и отвечает принципу методологии исследования образцов сред с признаками неоднородности, неопределенности и нечеткости.

К таким средам относятся горные породы и связанные с ними системы - дисперсная минеральная фаза как результат разрушения породы, пластовые воды с эффектами солеотложения и ряд других систем. О природе неоднородности горных пород указывают многие авторы, например, [70-72].

Среды с признаками неоднородности, неопределенности и нечеткости представляют собой статистически – вероятностные системы с высокими дисперсиями и коэффициентами вариации показателей свойств.

Методическое обеспечение определения свойств таких систем, например, горных пород слабо учитывает фактор неоднородности, что приводит к усилению факторов неоднородности и неопределенности пород.

Следствием факторов неоднородности и неопределённости указанных сред является необходимость выполнения большого числа идентичных измерений для набора статистически значимой совокупности с последующей обработкой этой совокупности с использованием методов теории вероятностей и математической статистики [73,74]. Число измерений по

одной экспериментальной точке может достигать нескольких сотен, что связано с высокими затратами.

Таким образом, фактор методической неопределенности и нечеткости измерения свойств статистических сред может рассматриваться как существенное препятствие при экспериментальном исследовании данных сред. В связи с вышеизложенным, при выполнении экспериментальных исследований таких осложнений как дисперсная минеральная фаза и солеотложения использование образцов натуральных сред разумно проводить в сочетании с предварительным изучением искусственных сред.

Принципиальную разницу между природными и искусственными системами можно проследить на примере горных пород. Природные породы затруднительно воспроизводимы на лабораторном опыте, в то время как искусственные породы поддаются воспроизведению. Искусственные (техногенные) материалы синтезируются из известных компонентов по определенным химическим методам, что предопределяет высокую однородность свойств таких материалов по сравнению с природными системами.

Невоспроизводимость природных пород означает, что нет способов или это сделать крайне трудно - получить полностью идентичный материал по совокупности свойств. А из этого следует, что результаты исследований такого рода материалов не могут быть перенесены на более общие системы.

Предложенная методология, основанная на использовании как искусственных, так и природных сред решает проблему неопределенности и нечеткости.

3.2.2 Солеотложения

Состав объектов исследования выбирали исходя из принципов системной методологии изучения магнитных эффектов (глава 2), по которым при высокой сложности натурных объектов готовят искусственные

образцы относительно простых составов, и их изучают в первую очередь, и только после этого исследуют сложные объекты.

В качестве объектов исследования использовали:

- приготовленные водные растворы карбоната кальция с концентрациями 1.0; 1,1 и 1,2 по отношению к предельной растворимости соли при комнатной температуре 25 °C;
- пробы пластовой жидкости, отобранные на Приобском, Приразломном, Мамонтовском, Малобалыкском и Русском месторождениях.

Использование карбоната кальция обусловлено его распространенностью при солеотложении в нефтедобыче [75], так же его преобладанием на объектах исследования.

Параметры магнитного воздействия:

- продолжительность контакта жидкого раствора с магнитным полем: 5; 10; 15 с;
- скорость потока 0,1-1 л/мин;
- тип магнитного поля - постоянное;
- напряженность магнитного воздействия 30-120 кА/м. Указанный диапазон принят на основании анализа работы [39], а так же на основании применяемых параметров в рассмотренных работах [38,61,66].

Водные растворы карбоната кальция

Введем параметр пересыщения p :

$$p = \frac{C_m - C_0}{C_0} \quad (3.1)$$

,где C_m - текущая концентрация соли в растворе; C_0 - концентрация соли в насыщенном растворе. В состоянии насыщения $p=1$; в состоянии пересыщения $p>1$.

Интенсивность образования осадка определяли с использованием методов аналитической химии [76]. Для определения содержания карбоната кальция навеску растворяют в избытке титрованного раствора соляной

кислоты. Непосредственно титровать нерастворимый в воде CaCO_3 было бы невозможно. Избыток кислоты титровали раствором щелочи.

Нами определены зависимости доли осажденного карбоната кальция от продолжительности контакта раствора с магнитным полем и параметра пересыщения, представленные на рис. 3.9. В табл. 3.1 приведены результаты наших экспериментальных исследований по доли осажденного карбоната кальция в зависимости от продолжительности контакта приготовленного водного раствора карбоната кальция с магнитным полем.

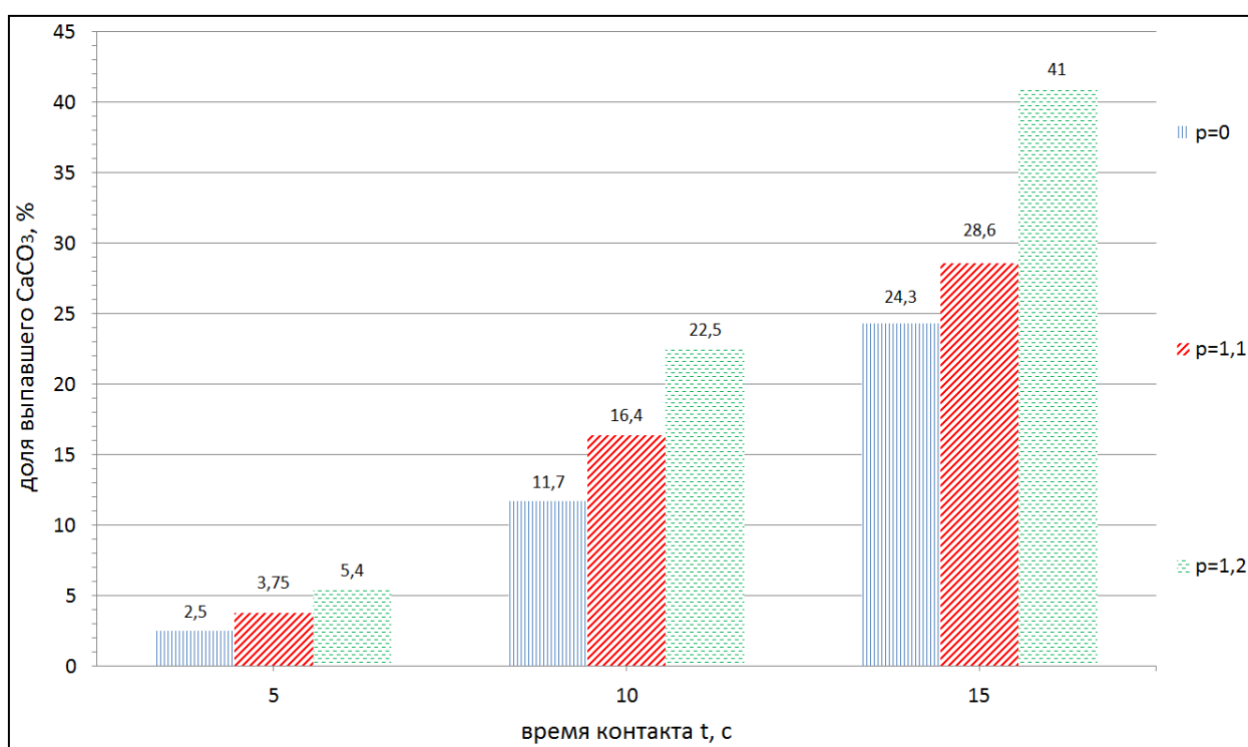


Рисунок 3.9 – Зависимость доли осажденного карбоната кальция от продолжительности контакта приготовленного водного раствора карбоната кальция с магнитным полем и параметра пересыщения

Как видно из рис.3.9, интенсивность осаждения карбоната кальция тем выше, чем больше показатель пересыщения и время контакта жидкого раствора с магнитным полем. Эффективность воздействия магнитным полем, принятая за величину доли выпавшего CaCO_3 относительно изменения времени контакта водного раствора с магнитным полем в интервале от 5 до

15 секунд составляет 24÷41 %. Эффективность увеличивается по мере увеличения параметра пересыщения раствора CaCO_3 .

Таблица 3.1 – Данные по доли осажденного карбоната кальция от продолжительности контакта приготовленного водного раствора карбоната кальция с магнитным полем

Параметр пересыщения	Время воздействия, с		
	5	10	15
	Доля выпавшего CaCO_3 , %		
0	2,5	11,7	24,3
1,1	3,75	16,4	28,6
1,2	5,4	22,5	41

В [77] показано, что степень пересыщения- основной показатель, определяющий интенсивность образования зародышей, что является первой стадией формирования кристаллического осадка процесса.

Интенсивность образования зародышей:

$$I = K(C - C_o)^m \quad (3.2)$$

,где K и m -постоянные, зависящие от физико- химических свойств растворенного вещества и растворителя. По ряду данных m находится в пределах от 3,5 до 4, что означает крайне высокую роль параметра пересыщения в процессах образования осадка из раствора [78].

Фактор пересыщения пока еще не находит отображения в исследованиях солеотложений в нефтедобыче, что затрудняет интерпретацию результатов экспериментальных данных.

На рисунке 3.10 представлен график зависимости доли осажденного карбоната кальция приготовленного водного раствора карбоната кальция от напряженности магнитного воздействия при разных пересыщениях.

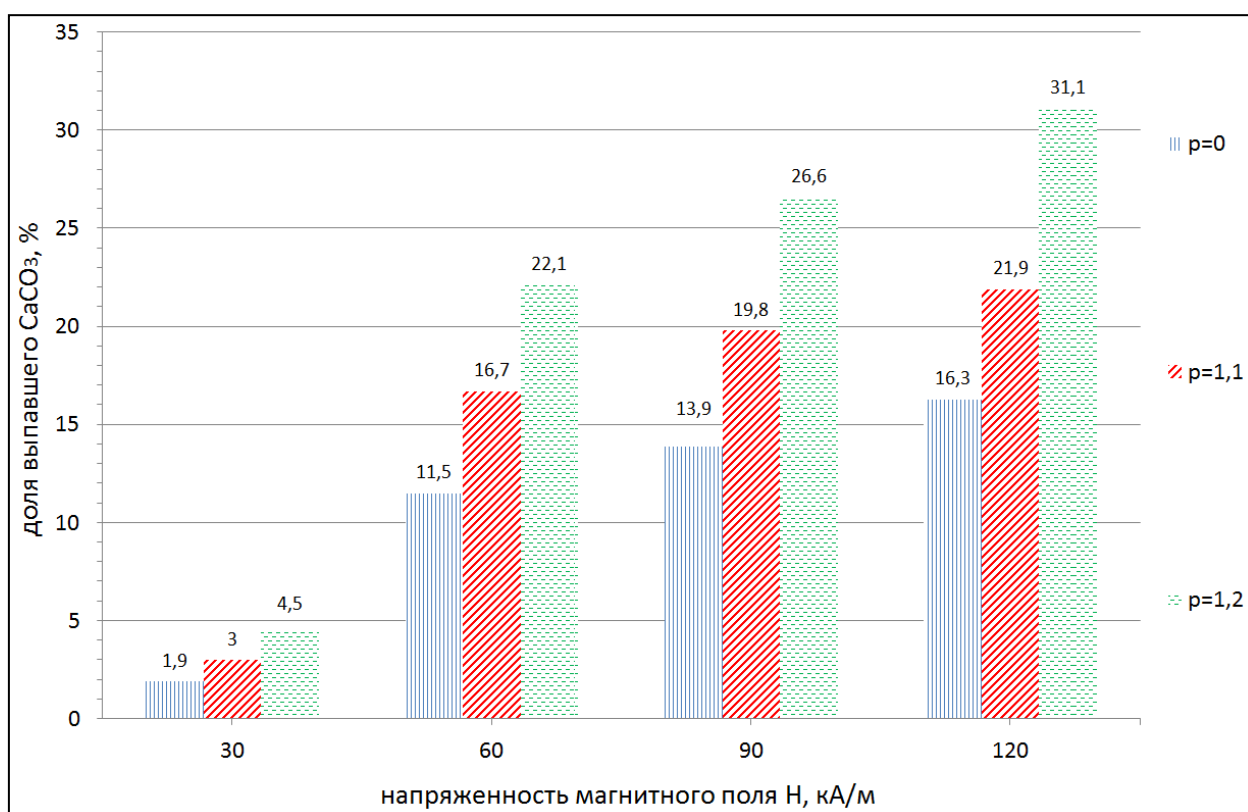


Рисунок 3.10 – Зависимость доли осажденного карбоната кальция приготовленного водного раствора карбоната кальция от напряжённости магнитного воздействия при разных пересыщениях

В таблице 3.2 приведены результаты наших экспериментальных исследований по доли осажденного карбоната кальция приготовленного водного раствора карбоната кальция в зависимости от напряженности магнитного воздействия при разных пересыщениях.

Таблица 3.2 – Данные по доли осажденного карбоната кальция приготовленного водного раствора карбоната кальция в зависимости от напряженности магнитного воздействия при разных пересыщениях

Параметр пересыщения	Напряженность магнитного поля H, кА/м			
	30	60	90	120
	Доля выпавшего CaCO ₃ , %			
0	1,9	11,5	13,9	16,3
1,1	3	16,7	19,8	21,9
1,2	4,5	22,1	26,6	31,1

Представленные на рис. 3.10 и табл. 3.2 результаты свидетельствуют о том, что влияние напряженности магнитного воздействия особенно велико при значимых пересыщениях, тогда как при умеренных пересыщениях сказывается много слабее. В данном случае эффективность воздействия при изменении напряженности магнитного поля от 30 до 120 кА/м составляет $16\div 31\%$. Стоит отметить, что увеличение напряженности магнитного поля до 60 кА/м приводит к резкому повышению доли выпавшего осадка на $11\div 22\%$, дальнейшее повышение напряженности слабо влияет на выпадение осадка.

Пластовая жидкость месторождений

Состав пластовой жидкости многокомпонентный и достаточно сложно оценить предельную растворимость, а также показатель пересыщения, поэтому исследование этих объектов проводили, изучая зависимость доли осажденного карбоната кальция в пластовой жидкости от времени контакта и напряженности магнитного воздействия, рис.3.11 и 3.12.

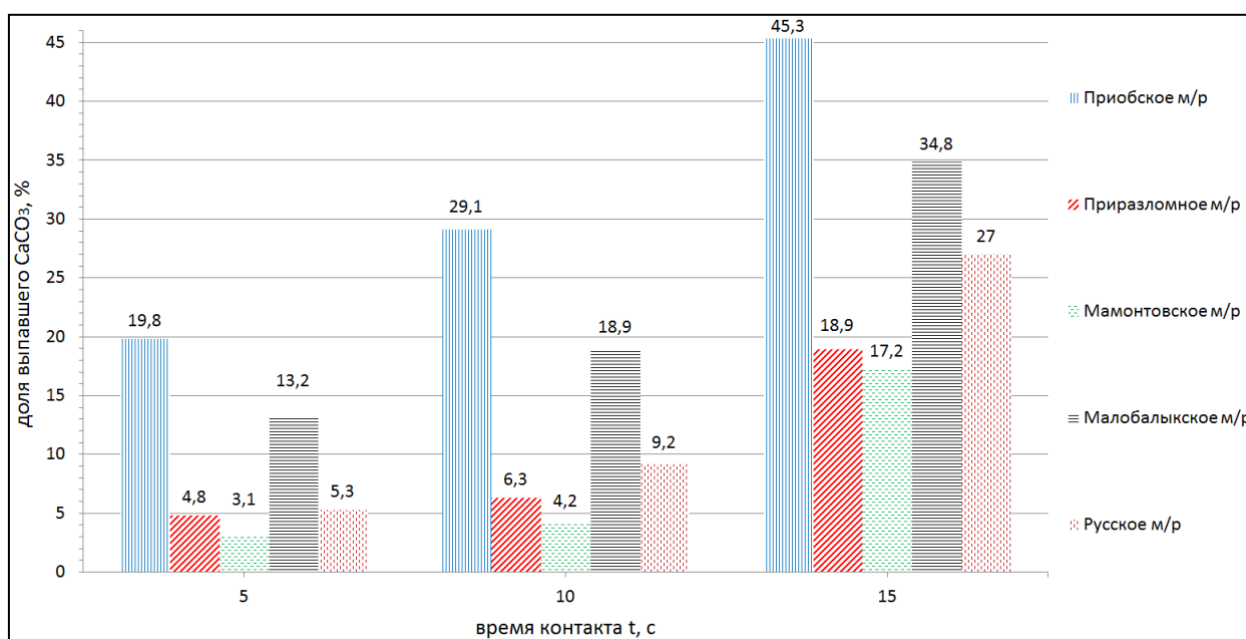


Рисунок 3.11 – Зависимость доли осажденного карбоната кальция в пластовой жидкости разных месторождений от времени контакта

В табл. 3.3 приведены результаты наших экспериментальных исследований по доле осажденного карбоната кальция в пластовые жидкости разных месторождений в зависимости от продолжительности контакта жидкого раствора с магнитным полем.

Таблица 3.3 – Данные по доле осажденного карбоната кальция в пластовые жидкости разных месторождений в зависимости от продолжительности контакта жидкого раствора с магнитным полем

Объект исследования	Время воздействия t, с		
	5	10	15
	Доля выпавшего CaCO ₃ , %		
Приобское м/р	19,8	29,1	45,3
Приразломное м/р	4,8	6,3	18,9
Мамонтовское м/р	3,1	4,2	17,2
Малобалыкское м/р	13,2	18,9	34,8
Русское м/р	5,3	9,2	27

Приведённые на рис. 3.11 и 3.12 результаты наших экспериментальных исследований подтверждают, что зависимость доли осажденного карбоната кальция в пластовой жидкости от напряженности магнитного воздействия выражена слабее, чем от длительности контакта, так же данная зависимость выражена и при использовании искусственных растворов карбоната кальция.

Таблица 3.4 – Данные по доле осажденного карбоната кальция в пластовых жидкостях разных месторождений в зависимости от напряженности магнитного воздействия

Объект исследования	Напряженность магнитного поля H, кА/м			
	30	60	90	120
	Доля выпавшего CaCO ₃ , %			
Приобское м/р	18,4	28,9	31,8	34,7
Приразломное м/р	3,4	6,4	9,1	11,8
Мамонтовское м/р	2,2	4	7,5	10,4
Малобалыкское м/р	11,6	19	22,4	25,7
Русское м/р	4,2	9,4	12,8	15,7

В табл. 3.4 приведены результаты наших экспериментальных исследований по доле осажденного карбоната кальция в пластовых жидкостях разных месторождений в зависимости от напряженности магнитного воздействия. Время контакта составляло 10 с во всех случаях.

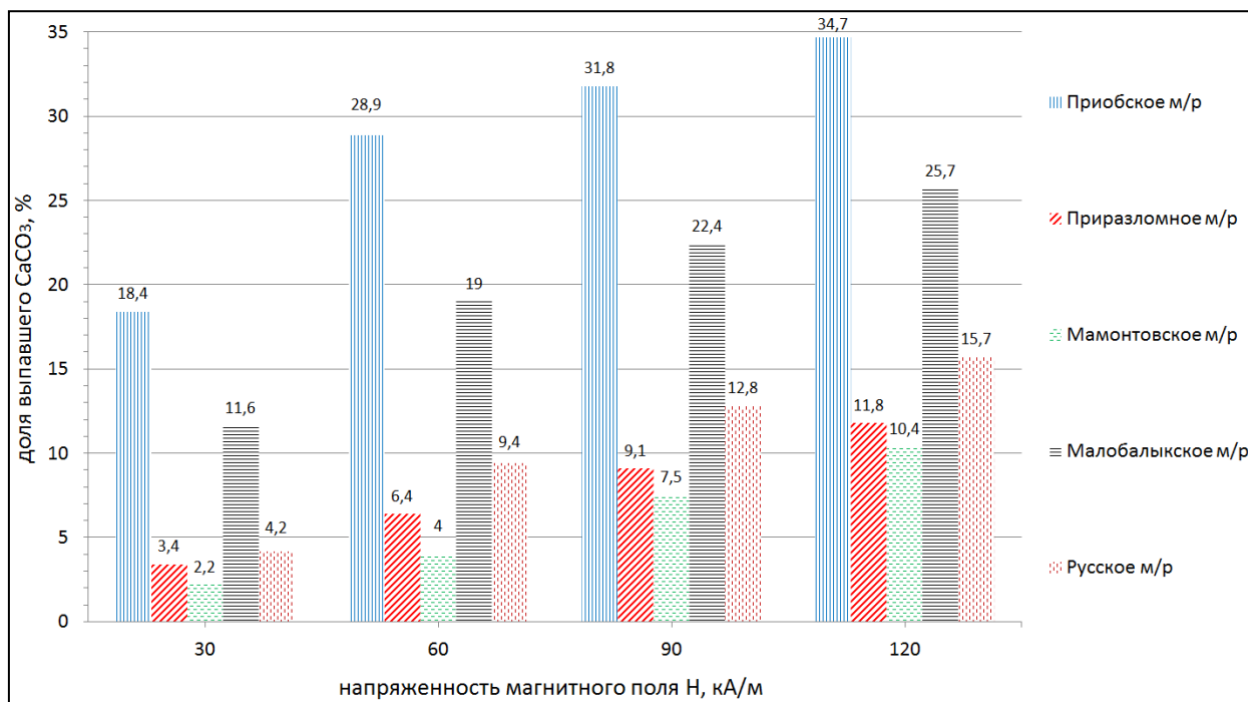


Рисунок 3.12 – Зависимость доли осажденного карбоната кальция в пластовых жидкостях разных месторождений от напряженности магнитного воздействия

Эффективность воздействия магнитным полем, принятая за величину доли выпавшего CaCO_3 относительного изменения времени контакта водного раствора с магнитным полем в интервале от 5 до 15 секунд составляет от 17÷45 %. В то время как эффективность воздействия при изменении напряженности магнитного поля от 30 до 120 кА/м составляет 10÷34%.

По результатам наших экспериментальных исследований, представленных на рис. 3.11 и 3.12 видно, что характер зависимости доли осажденных солей пластовой жидкости от времени контакта и напряженности магнитного поля близок к аналогичной зависимости для

водного раствора карбоната кальция (рис. 3.9, 3.10) за исключением того, что для пластовой жидкости наблюдается разброс в пределах одного параметра времени контакта и напряженности магнитного поля. Это может быть связано с тем, что пластовая жидкость имеет сложный состав, и конденсация осадка происходит по разным механизмам через формирование комплексов солей.

Таким образом, на основании результатов экспериментальных работ по изучению влияния магнитного поля на водные растворы карбоната кальция и пластовую жидкость можно сделать следующие выводы:

- установлена прямая зависимость интенсивности осаждения карбоната кальция от параметра пересыщения при воздействии магнитным полем;
- магнитное поле ускоряет процесс осаждения солей как в случае растворов карбоната кальция, так и пластовой жидкости;
- в пределах малых промежутков времени отмечено быстрое возрастание доли осадка от времени контакта, а также от напряженности магнитного воздействия.

Вместе с тем, полученные данные не дают ответа на вопрос о механизмах влияния осадка на УЭЦН. Так, в [61] указывается, что магнитное поле вызывает ускоренное зародышеобразование и формирование большого числа мелких кристаллов. Однако это утверждение не подтверждено данными по определению числа зародышей и размеров кристаллов. Кроме того, в отношении механизмов образования осадка на УЭЦН упомянутая версия имеет определенные возражения, связанные с тем, что зародыши особо мелких размеров обладают крайне высокой удельной поверхностью и химической активностью, что только усиливает вероятность закрепления осадка на поверхности колеса.

Для проверки этого факта нами проведены (глава 5) исследования при отработке конструкции и модернизации рабочего узла УЭЦН с дополнительным магнитным элементом.

3.2.3 Пескопроявления (дисперсная минеральная фаза)

Как следует из приведенных в главе 1 данных, пескопроявление или генерация дисперсной минеральной фазы - наиболее значимое осложнение в нефтедобыче. В то же время, пескопроявление – наименее изученное осложнение в плане понимания механизмов воздействия магнитного поля на генерируемую дисперсную минеральную фазу (ДМФ). Можно сказать, что пока еще не выработаны системные представления о целях магнитной технологии дисперсной минеральной фазой, вызывающей абразивный износ УЭЦН.

Чтобы составить план экспериментальных работ по изучению влияния магнитного поля на ДМФ целесообразно рассмотреть вопросы генезиса пескопроявления и ДМФ.

Анализ литературных данных указывает, что причина пескопроявления - разрушение пород- коллекторов [79-84]. В публикации А.М. Пирвердяна [79] установлено, что к песчаным следует относить скважины с содержанием механических примесей более 1 г/л в добываемой жидкости. В [80] отмечена связь между разрушением пласта и прорывом воды.

В [81] указывается на избирательный характер разрушения слабосцементированных песчаников, вызванный образованием высокопроницаемых каналов вдоль трещин, развитых в продуктивном пласте по вертикали и вдоль плоскостей напластования слоев, рис. 3.13.

В [82] к причинам и факторам пескопроявлений отнесены:

- слабосцементированный коллектор;
- вязкость пластового флюида;
- скорость движения флюида в пласте;
- депрессия;
- напряжения в призабойной зоне пласта;
- загрязненность призабойной зоны пласта.

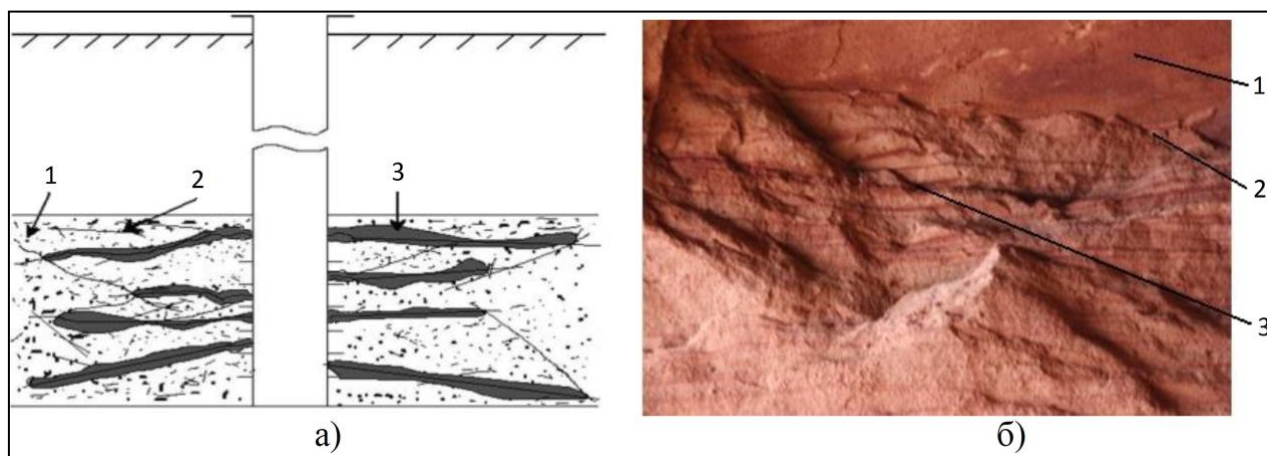


Рисунок 3.13 – Схема разрушения ПЗП Гатчинского ПХГ [81]: а – образование высокопроницаемых каналов в ПЗП, полученное в результате анализа работы скважин; б – разрушение терригенных девонских песчаников из обнажений коренных пород Ленинградской области. 1 – слабосцементированный песчаник; 2 – тектоническая трещиноватость; 3 – высокопроницаемые каналы в песчанике

В [83] среди факторов пескопроявлений отмечены такие позиции как прорыв воды, истощение пласта, аномальное распределение вертикальных и горизонтальных стрессов в пласте, частые изменения перепадов давления на забое как результат внезапных и частых остановок скважины.

В [84] для экспериментального исследования разрушения пород в процессах фильтрационных взаимодействий использован метод приготовления искусственных образцов горных породах, и показано, что разрушение песчаников происходит в несколько этапов по механизму вымывания связки из узлов пространственного каркаса. Таким образом, экспериментально доказано разрушение песчаника в результате проникновения воды по поровому пространству песчаника.

На рис. 3.14 представлен график зависимостей коэффициента проницаемости песчаника от времени.

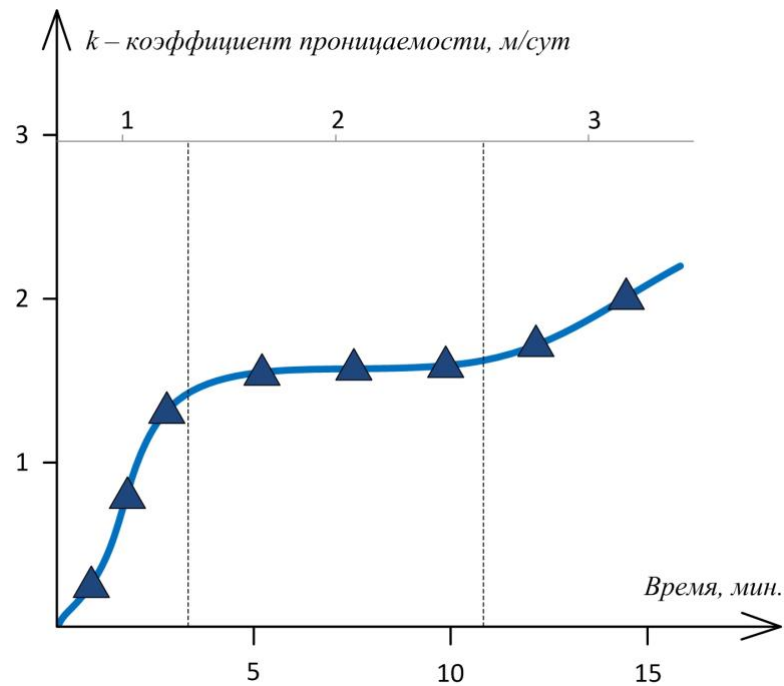


Рисунок 3.14 – Зависимость коэффициента проницаемости песчаника от времени [84]

Результатом разрушения песчаника становится образование большого числа частиц дисперсной минеральной фазы - обломков породы. Обломки песчаника представляют собой агломераты из зерен породы, рис.3.15. На представленном микроснимке, выполненном нами при помощи цифрового микроскопа Motic модель DMBA-310, наглядно показано строение агломерата из зёрен породы.

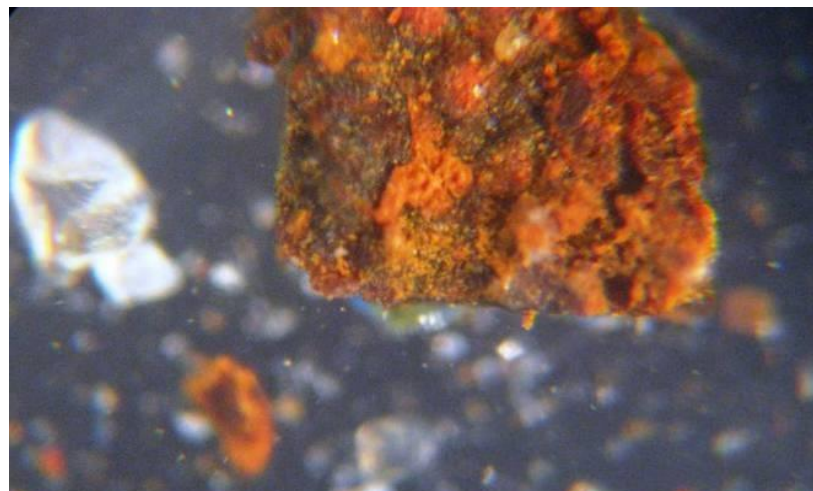


Рисунок 3.15 – Агломерированная минеральная частица

С точки зрения интенсивности воздействия на рабочие узлы УЭЦН принципиальное значение имеет размер частиц породы в момент столкновения с узлами УЭЦН. Следует отметить сходство и различие между такими осложнениями как солеотложение и дисперсная минеральная фаза. Признаки схожести этих осложнений состоят в том, что в обоих случаях узлы УЭЦН испытывают воздействие дисперсной фазы, однако природа этих фаз разная:

- в случае солеотложения из растворов пластовой жидкости формируются гидратированные комплексы малых размеров и высокой химической активности;
- в случае пескопроявления формируется дисперсная минеральная фаза, которая в большинстве случаев (за исключением коллоидной глинистой фракции) представлена малоактивными частицами.

Поэтому для солеотложения значимы физико - химические взаимодействия, а для дисперсной минеральной фазы - энергетические механизмы (эрозионные, абразивные и др.).

Очевидно при одной и той же скорости кинетическая энергия тонких частиц будет меньше, чем крупных агрегированных частиц.

Из этого следует, что целью магнитного воздействия может быть диспергирование дисперсной минеральной фазы до тонких частиц.

В литературе мало сведений относительно размеров частиц, образующихся при разрушении пород.

Так, в [85] в компании ООО «РН-Пурнефтегаз» выполнены исследования гранулометрические исследования, и показано, что размеры основной части механических частиц составляют от 0,16 до 0,1 мм (51%), рис. 3.16.



Рисунок 3.16 – Микрофотография механических частиц [85]

Более полные данные по распределению частиц по размерам приведены в [86], где представлены частотные распределения частиц по размерам, рис. 3.17.

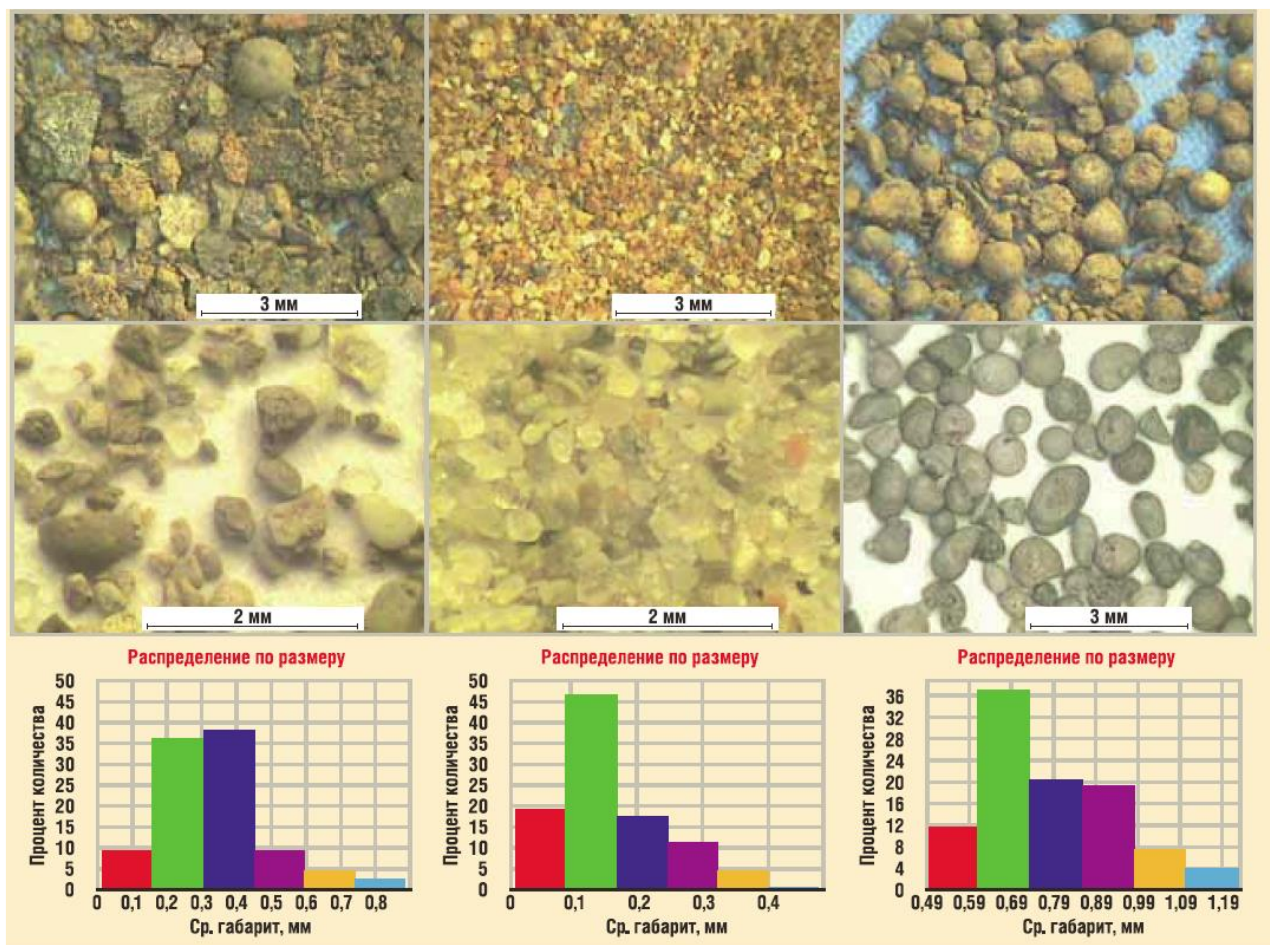


Рисунок 3.17 – Частотные распределения частиц по размерам [86]

Многие источники [87-89] указывают на то, что горные породы имеют микронную и более тонкую пористость, что указывает на гораздо меньшие размеры частиц породы, чем по данным [86].

Остаются не исследованными вопросы изменения размеров частиц горной породы от момента разрушения породы до непосредственного контакта с узлами УЭЦН. Обломочные фрагменты породы при движении в потоке нефти под действием сдвиговых напряжений способны диспергироваться до более тонких частиц. Эти положения основаны на принципах термодинамики, физико-химической механики [90] и теории разрушения горных пород [91].

Характеристики пород - коллекторов месторождений объектов - исследований

Преимущественно породы-коллекторы объектов исследования представлены мелкозернистыми песчаниками, крупнозернистыми алевролитами, а так же переслаиванием мелко- и среднезернистого песчаника.

По вещественному составу породы близки к полимиктовому типу. Основными породообразующими минералами являются кварц (35 %), полевые шпаты (45 %), обломки горных пород (15 %) и слюды (5 %).

Полевые шпаты представлены калиево-натриевыми или калиевыми плагиоклазами и ортоклазами. Обломки горных пород содержат кварцит, кремнистые и кварц-полевошпатовые осадочные и эффузивные разности. Слюды представлены преимущественно мусковитом, биотитом и хлоритом. Глинистый цемент имеет состав в виде каолинита (45%), хлорита (35%), гидрослюды (20%) и в отдельных случаях кальцит с содержанием около 5%. Пористость в среднем варьируется в диапазон 16-31 %, проницаемость в пределах от 6,4 - 467 мД.

Экспериментальные исследования магнитного воздействия на ОНФ - системы с дисперсной минеральной фазой

Экспериментальные исследования строились в несколько этапов:

- приготовление искусственных образцов песчанистых пород;
- проведение имитационно-фильтрационных испытаний искусственных образцов до разрушения и образования обломочной дисперсной минеральной фазы;
- выполнение исследований по магнитному воздействию на водную суспензию с частицами - обломками с целью диспергирования частиц;
- выполнение исследований по магнитному воздействию на нефти с частицами – обломками с целью диспергирования частиц.

Для приготовления искусственных образцов песчанистых пород использовали алюмо- и кремнеоксидные соединения, как наиболее распространенные компоненты горных пород.

Приготовление образцов песчанистых пород производили с использованием минеральных частиц, коллоидных частиц (цемента) и воды.

Для проведения исследований изготовлены образцы песчанистых пород составов:

- минеральный компонент - безводная химически инертная модификация окиси алюминия - Al_2O_3 (корунд);
- коллоидная компонента - SiO_2 (кремнезоль);
- вода дистиллированная.

Корунд использовался как минеральная основа скелета породы, прочность которого создавалась за счет части коллоидной фракции, которая связывала частицы минерального скелета между собой.

Приготовление образцов состояло в нескольких процедурах:

- изготовление сырого материала путем смешения компонентов в заданных пропорциях и формовании образцов;

- сушка образцов при температуре 150 - 200 °С и выше для удаления избыточной влаги и регулирования влагосодержания;
- определение свойств образцов: плотности, пористости и др.

Таким образом, были приготовлены образцы песчанистых пород состава:

- Al_2O_3 - 95 масс. %, SiO_2 -5 масс. %.

Выбор способа разрушения образцов был обусловлен процессами обводнения пород, при которых в результате фильтрационных взаимодействий вода - порода происходит разрушение пород.

Испытания образцов пород при гидродинамическом воздействии выполняли по схеме опыта Дарси с созданием определенного гидростатического напора жидкости h вплоть до разрушения образца (рис. 3.18).

Эта схема позволяет имитировать условия обводнения.

В опыте Дарси устанавливается соотношение между расходом воды Q , проходящей через образец породы, и потерей гидростатического напора жидкости h :

$$Q \sim \frac{F}{L} h \quad (3.3)$$

,где F - площадь поперечного сечения сосуда, L - высота образца.

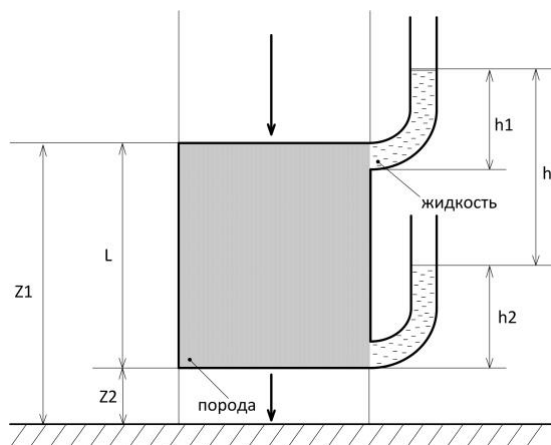


Рисунок 3.18 – Схема опыта Дарси

Разрушение образцов песчаников происходило при давлениях 2 - 2,5 МПа, обломочные фрагменты высушивали и определяли размеры в оптическом цифровом микроскопе.

На следующем этапе выполняли исследования по магнитному воздействию на водную суспензию с частицами - обломками с целью определения возможности диспергирования частиц. Концентрация фрагментов песчаника в воде составляла 3 масс. %.

Параметры магнитного воздействия: интенсивность - 120 кА/м; продолжительность - 5 с.

Расчет диаметров частиц после магнитной обработки выполняли по микрофотографиям при помощи программного продукта ImageTool v.300.

Микроснимки выполняли при помощи цифрового микроскопа Motic модель DMBA-310 (рис. 3.19).



Рисунок 3.19 – Цифровой микроскоп Motic модель DMBA-310

На рис. 3.20 приведены результаты наших экспериментальных исследований в виде гистограмм распределения частиц песчаника по диаметру до и после магнитной обработки.

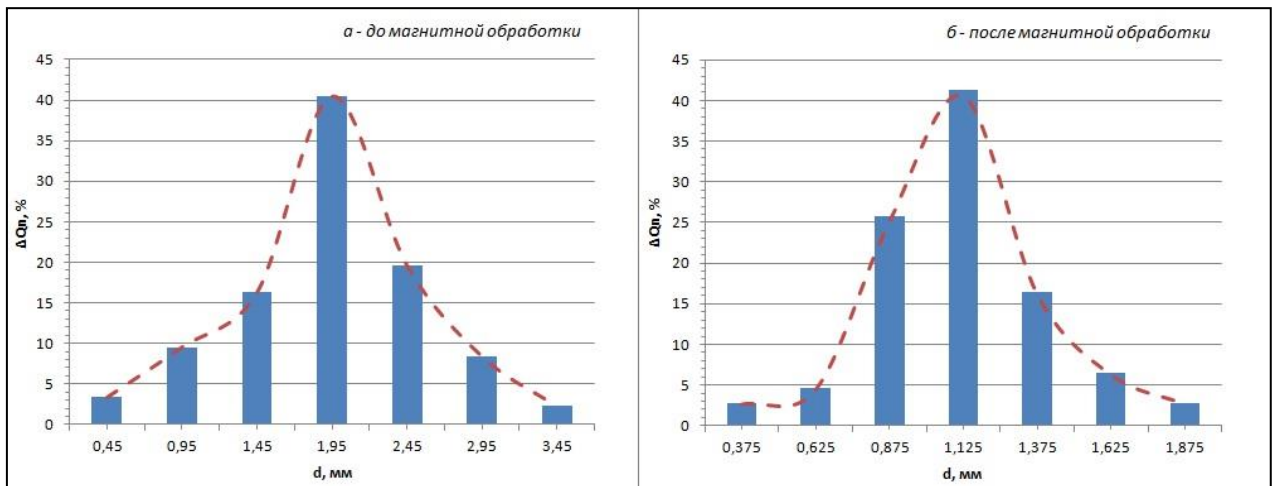


Рисунок 3.20 – Гистограммы распределения частиц песчаника по диаметру до и после магнитной обработки. Объект: водная суспензия с частицами- обломками песчаника

В табл. 3.5 приведены результаты наших экспериментальных исследований в виде параметров частотного распределения частиц песчаника по диаметру до и после магнитной обработки. Объект: водная суспензия с частицами- обломками песчаника.

Таблица 3.5 – Параметры частотного распределения частиц песчаника по диаметру до и после магнитной обработки. Объект: водная суспензия с частицами - обломками песчаника

Параметры	Значимые диапазоны диаметра частиц песчаника до магнитной обработки, мм						
Интервал диаметров $d, \text{мм}$	0,2÷0,7	0,7÷1,2	1,2÷1,7	1,7÷2,2	2,2÷2,7	2,7÷3,2	3,2÷3,7
Средний диаметр $d_i, \text{мм}$	0,45	0,95	1,45	1,95	2,45	2,95	3,45
Частота $\Delta Q_n, (\%)$	3,4	9,5	16,3	40,4	19,7	8,4	2,3
Параметры	Значимые диапазоны диаметра частиц песчаника после магнитной обработки, мм						
Интервал диаметров, мм	0,25÷0,5	0,5÷0,75	0,75÷1	1÷1,25	1,25÷1,5	1,5÷1,75	1,75÷2
Средний диаметр $d_i, \text{мм}$	0,375	0,625	0,875	1,125	1,375	1,625	1,875
Частота $\Delta Q_n, (\%)$	2,7	4,6	25,7	41,3	16,5	6,4	2,8

Для исследования влияния длительности магнитного воздействия на параметры распределения использовали такую характеристику как среднечисленный диаметр распределения.

На рис. 3.21 приведены результаты наших экспериментальных исследований в виде графической зависимости среднечисленного диаметра песчаника d_n от длительности магнитного воздействия. При изменении длительности воздействия магнитным полем с 5 с. до 15 с. среднечисленный диаметр песчаника d_n уменьшается с 0,95 мм до 0,84 мм, что отражает присутствие эффекта диспергирования частиц.

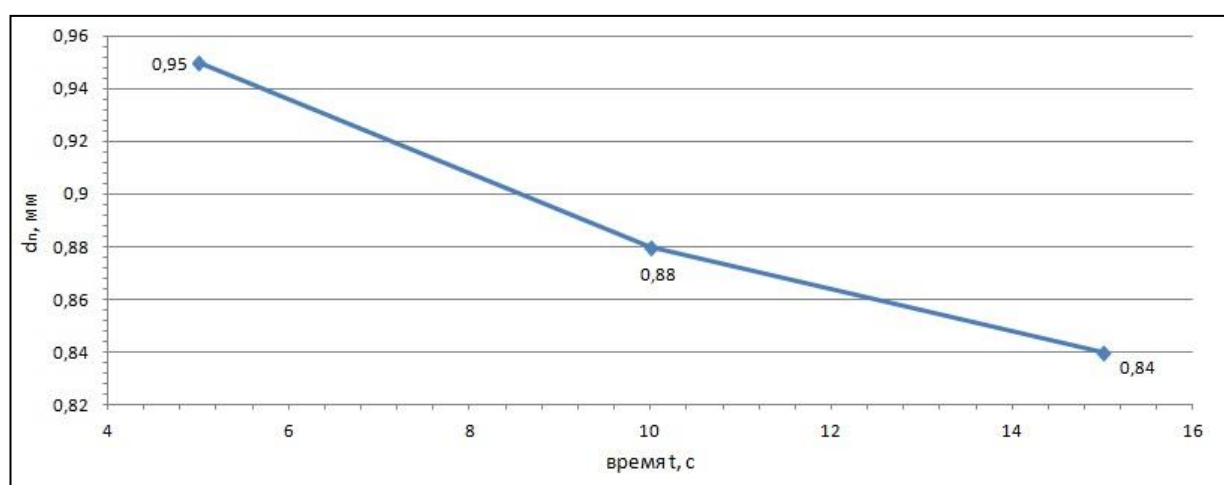


Рисунок 3.21 – Зависимость среднечисленного диаметра частиц от длительности магнитного воздействия

Из сопоставления гистограмм распределения частиц песчаника по диаметру (рис. 3.20) до и после магнитной обработки следует, что магнитная обработка способствует уменьшению среднего размера частиц от 1,93 до 0,95 мм, что означает достижение существенного эффекта диспергирования частиц. Эффективность принятая за величину относительного изменения среднечисленного диаметра частиц составляет 50,7 %. Одновременно достигается эффект снижения параметра дисперсии и гомогенизации совокупности частиц по размеру за счет разрушения крупных частиц - агломератов. Отдельно следует указать на значимость такого параметра как длительность обработки (рис. 3.21), что можно объяснить кинетическим

механизмом процесса диспергирования агломератов. Эффективность, принятая за величину относительного изменения среднечисленного диаметра частиц составляет 11,5 %.

Тем самым установлена возможность диспергирования обломочных агломератов крупных размеров, что имеет принципиальное значение с точки зрения технологии управления таким осложнением как пескопроявление. Устранение крупных агломератов магнитным полем – ключевой этап технологии управления эффективностью работы электроцентробежных насосов при эксплуатации в осложнённых условиях [92].

На следующем этапе работ для исследования магнитного воздействия системы с дисперсной фазой использовали более сложный объект – композицию из нефти Мамонтовского месторождения (скважина №5888) и обломочные фрагменты песчаника, описанного и применённого ранее.

Концентрация фрагментов песчаника в нефти составляла 3 масс. %.

Параметры магнитного воздействия: интенсивность- 120 кА/м; продолжительность - 5 с.

Результаты магнитного воздействия на композицию нефти с фрагментами песчаника приведены на рис. 3.22.

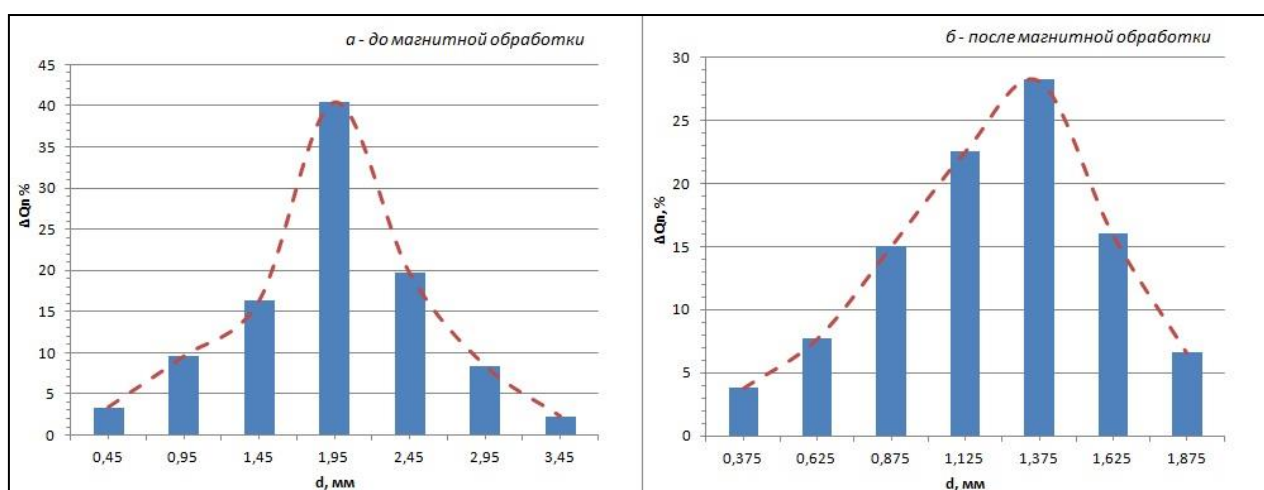


Рисунок 3.22 – Гистограммы распределения частиц песчаника по диаметру после магнитной обработки. Объект: композиция нефти с частицами- обломками песчаника

Таблица 3.6 – Параметры частотного распределения частиц песчаника по диаметру до и после магнитной обработки. Объект: композиция нефти с фрагментами песчаника

Параметры	Значимые диапазоны диаметра частиц песчаника до магнитной обработки, мм						
Интервал диаметров, мм	0,2÷0,7	0,7÷1,2	1,2÷1,7	1,7÷2,2	2,2÷2,7	2,7÷3,2	3,2÷3,7
Средний диаметр d_i , мм	0,45	0,95	1,45	1,95	2,45	2,95	3,45
Частота ΔQ_n , (%)	3,4	9,5	16,3	40,4	19,7	8,4	2,3
Параметры	Значимые диапазоны диаметра частиц песчаника после магнитной обработки, мм						
Интервал диаметров, мм	0,25÷0,5	0,5÷0,75	0,75÷1	1÷1,25	1,25÷1,5	1,5÷1,75	1,75÷2
Средний диаметр d_i , мм	0,375	0,625	0,875	1,125	1,375	1,625	1,875
Частота ΔQ_n , (%)	3,8	7,7	15	22,6	28,3	16	6,6

Как следует из результатов наших экспериментальных исследований (рис. 3.22), в случае композиции нефть с фрагментами песчаника эффект дробления минеральных частиц так же имеет место быть, что подтверждается уменьшением среднего размера частиц от 1,93 до 1,22 мм, но выражен существенно слабее, чем в водных суспензиях. Это связано, вероятно, с существенно большей вязкостью нефти по сравнению с водой. Эффективность, принятая за величину относительного изменения среднечисленного диаметра частиц составляет 36,7 %.

Таким образом, на основе выполненных исследований по магнитному воздействию на пескопроявления (генерация дисперсной минеральной фазы) можно сделать следующие выводы:

- использованная методология опытных работ характеризуется как системная и устойчивая в плане получения воспроизводимых результатов, что позволяет сделать достоверные обобщения, системные методические и технологические решения;

- впервые показано, что с помощью магнитной обработки может достигаться устойчивый эффект диспергирования элементов горной породы в составе композиции как нефти, так и воды с дисперсной минеральной фазой;
- установленный эффект диспергирования элементов горной породы позволяет сформулировать принципы технологии повышения эффективной эксплуатации ЭЦН при пескопроявлениях.

3.2.4 Парафиноотложения

Объектами исследования были нефти Приобского, Приразломного, Мамонтовского, Малобалыкского, и Русского месторождений.

Цель исследований - изучение возможности снижения вязкости нефти объектов исследования при помощи воздействия магнитным полем.

Параметры магнитного воздействия: интенсивность- 30-120 кА/м; продолжительность - от 5 до 15 с.

Параметр вязкости образцов исследования определяли при помощи ротационного вискозиметра Rheotest модель RN 4.1 (рис. 3.23).



Рисунок 3.23 – Ротационный вискозиметр Rheotest модель RN 4.1

На рис. 3.24 показана зависимость вязкости нефти Мамонтовского, Малобалыкского, Приразломного, Приобского и Русского месторождений от продолжительности магнитного воздействия.

Эффективность, принятая за величину относительного изменения вязкости нефти до и после магнитной обработки при изменении времени контакта обрабатываемого образца от 5 до 15 секунд составляет 20÷41%.

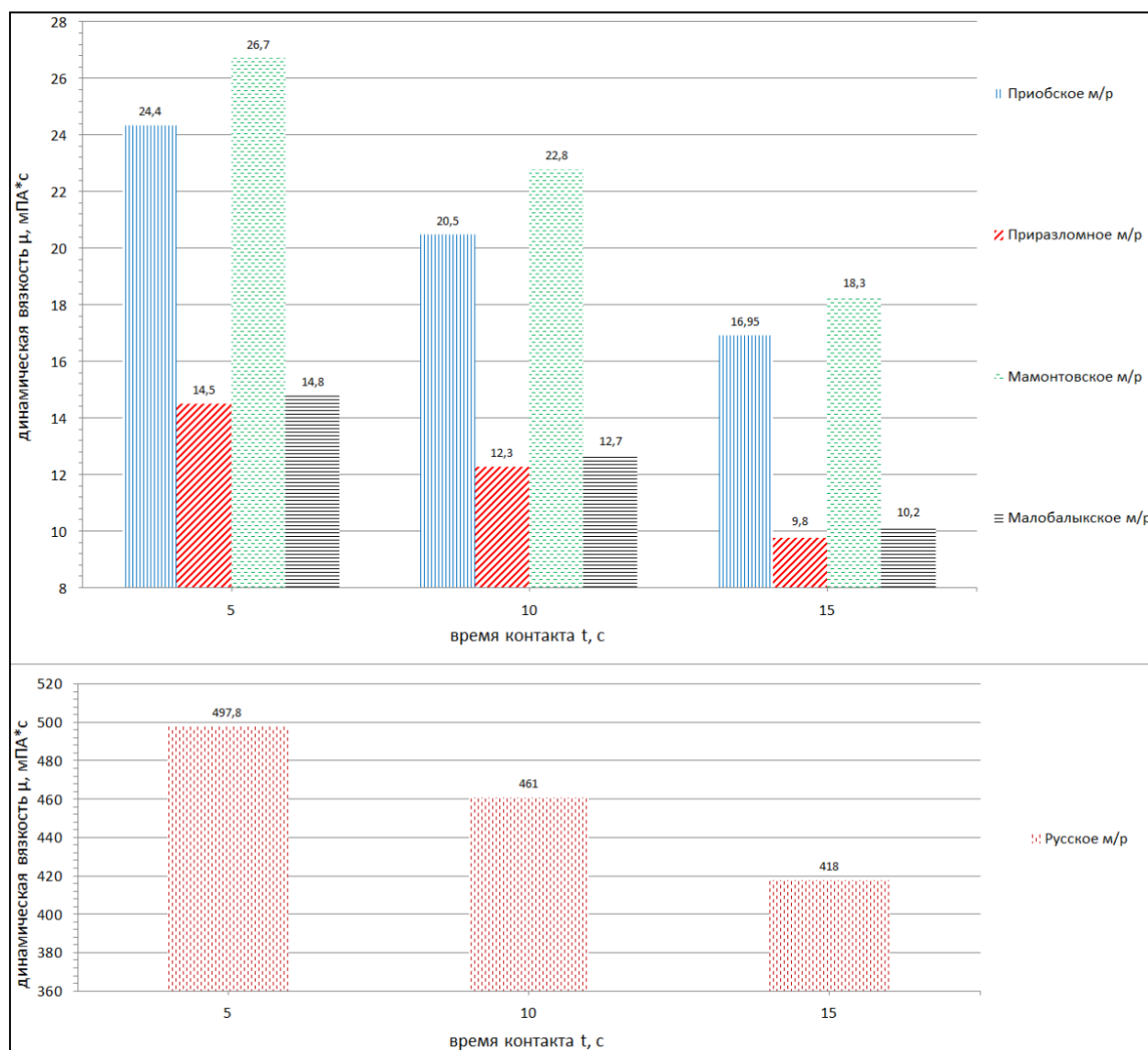


Рисунок 3.24 – Зависимость вязкости нефти Приобского, Приразломного, Мамонтовского, Малобалыкского, и Русского месторождений от продолжительности магнитного воздействия

В табл. 3.7 приведены данные наших экспериментальных исследований по вязкости нефти Мамонтовского, Малобалыкского, Приразломного, Приобского и Русского месторождений от продолжительности магнитного воздействия.

Таблица 3.7 – Данные по вязкости нефти Приобского, Приразломного, Мамонтовского, Малобалыкского, и Русского месторождений от продолжительности магнитного воздействия

Параметр пересыщения	Время воздействия t, с		
	5	10	15
	Динамическая вязкость μ , мПа*с		
Приобское м/р	24,4	20,5	16,95
Приразломное м/р	14,5	12,3	9,8
Мамонтовское м/р	26,7	22,8	18,3
Малобалыкское м/р	14,8	12,7	10,2
Русское м/р	497,8	461	418

Снижение вязкости нефти при магнитном воздействии может быть связано с разрушением пространственных комплексов, образующихся в присутствии парафинов и асфальтенов [54]. Данные представления подтверждены экспериментально, влияют на снижение интенсивности отложения АСПО. Текущие экспериментальные данные доказывают практическую возможность снижения вязкости нефти при воздействии магнитным полем [78].

На рис. 3.25 приведена зависимость вязкости нефти Мамонтовского, Малобалыкского, Приразломного, Приобского и Русского месторождений от напряженности магнитного поля.

Эффективность, принятая за величину относительного изменения вязкости нефти до и после магнитной обработки образца при изменении напряженности магнитного поля от 30 до 120 кА/м составляет 14÷34%.

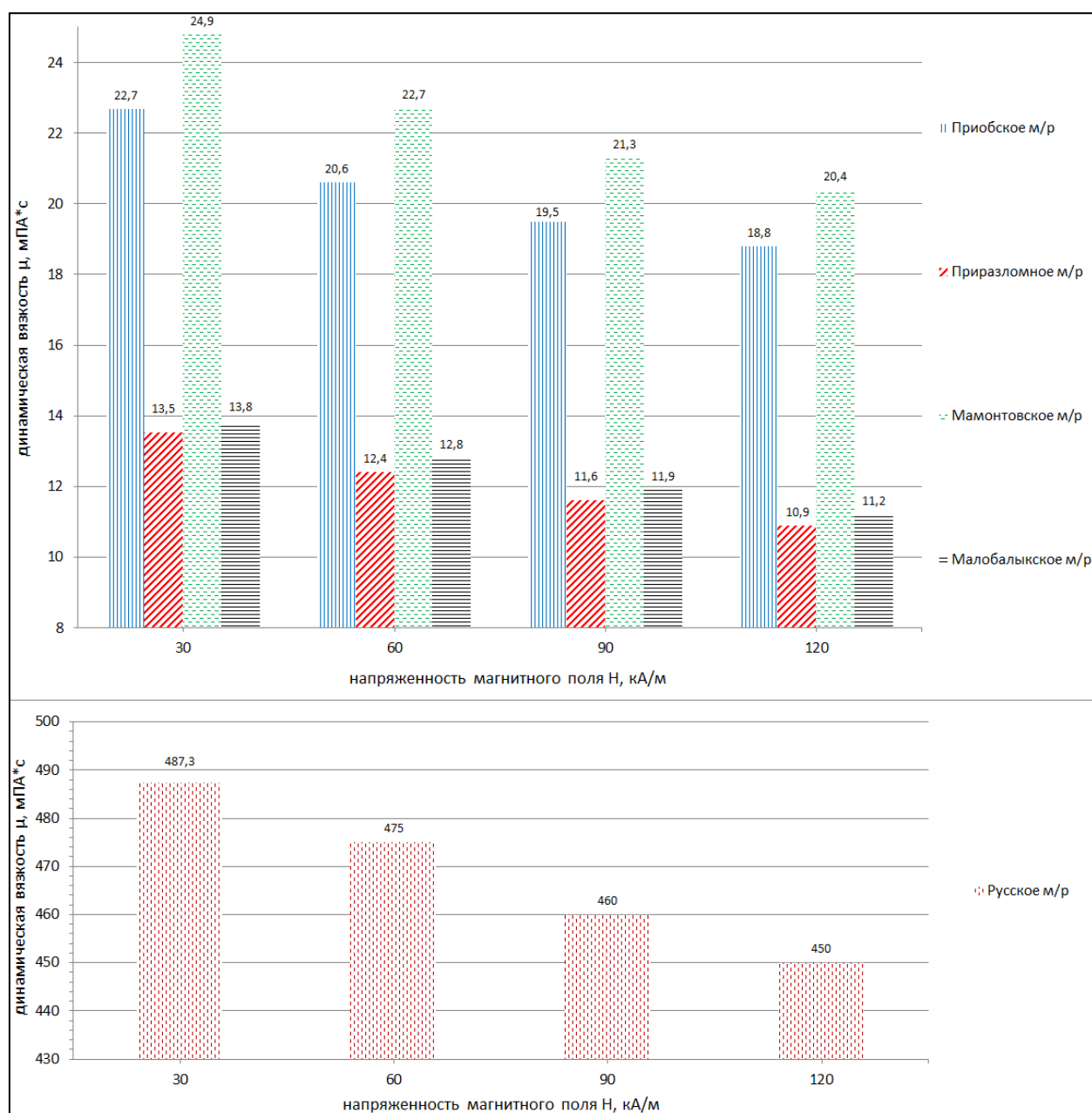


Рисунок 3.25 – Зависимость вязкости нефти Приобского, Приразломного, Мамонтовского, Малобалыкского, и Русского месторождений от интенсивности воздействия

Как видно из рис. 3.25 и табл. 3.8, зависимость изменения вязкости нефти от напряжённости магнитного воздействия выражена слабее, чем от длительности контакта.

Таким образом, опытным путем показано, что воздействие магнитным полем снижает вязкость нефти Мамонтовского, Малобалыкского, Приразломного, Приобского и Русского месторождений.

Таблица 3.8 – Данные по вязкости нефти Мамонтовского, Малобалыкского, Приразломного, Приобского и Русского месторождений от напряженности воздействия

Объект исследования	Напряженность магнитного поля Н, кА/м			
	30	60	90	120
	Динамическая вязкость μ , мПа*с			
Приобское м/р	22,7	20,6	19,5	18,8
Приразломное м/р	13,5	12,4	11,6	10,9
Мамонтовское м/р	24,9	22,7	21,3	20,4
Малобалыкское м/р	13,8	12,8	11,9	11,2
Русское м/р	487,3	475	460	450

3.3 Анализ результатов экспериментальных исследований и уточнение задачи построения физико-механических принципов формирования структурообразования в ОНФ - системе при магнитной обработке

Обобщение результатов экспериментальных исследований по магнитной обработке ОНФ - систем позволяет сделать ряд принципиальных утверждений:

- магнитное воздействие может быть эффективным средством управления такими осложнениями нефтедобычи как солеотложения, пескопроявления (генерация дисперсной минеральной фазой) и парафиноотложения;
- появляется возможность сформулировать термодинамический подход к объяснению механизмов воздействия на ОНФ- системы;
- разработанная методология исследований влияния магнитного поля на ОНФ - системы, построенная на системных подходах и предусматривающая приготовление искусственных образцов, позволила обеспечить устойчивость получаемых результатов и достоверность интерпретаций;

- проверка выдвинутых гипотез по магнитной обработке ОНФ - систем может быть продолжена на объектах более сложной природы по сравнению с искусственными породами - на кернах пород.

Термодинамический подход к объяснению механизмов магнитного воздействия на ОНФ - системы состоит в рассмотрении способов распространения энергии электромагнитного поля в сплошном теле [93].

Электромагнитная волна, попадая на среду с системой зарядов, придает им импульс движения. Это движение сопровождается излучением во все стороны: происходит рассеяние первоначальной волны. В конечном итоге электромагнитная энергия переходит в тепловую.

Так, в случае пескопроявления (генерация дисперсной минеральной фазы) и парафиноотложения есть основания считать, что конденсация энергии происходит на дефектных областях ОНФ-систем - границах агломератов и ассоциатов, что приводит к диспергированию этих образований и гомогенизации нефтяных систем.

В случае солеотложения энергия магнитного поля расходуется на создание - зарождение и рост гидратированного кристаллического осадка.

В плане научной новизны перспективны исследования процессов формирования структурообразования в ОНФ-системе при магнитной обработке. Задача такого плана в случае генерации дисперсной минеральной фазы - определение микроструктурных механизмов разрушения и диспергирования песчаника, а в случае солеотложения - поиск механизмов управления солеотложением с целью снижения его влияния на работу УЭЦН.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

1. Предложены принципы методологии проведения лабораторных испытаний ОНФ - систем в условиях воздействия магнитного поля.
2. На основе анализа аппаратурных решений лабораторных испытаний по воздействию магнитного поля на исследуемые системы создана лабораторная

установка, используемая для изучения изменения ОНФ-систем при воздействии постоянным магнитным полем.

3. Установлена прямая зависимость интенсивности осаждения карбоната кальция от параметра пересыщения при воздействии магнитным полем. Воздействие магнитного поля в течении 15 секунд на водный раствор карбоната кальция увеличивает количество выпадающего осадка CaCO_3 на $24 \div 41\%$, эффект увеличивается от 24% до 41% по мере изменения параметра пересыщения от 0 до 1,2. Увеличение напряженности магнитного поля до 60 кА/м приводит к резкому повышению доли выпавшего осадка на $11 \div 22\%$, дальнейшее повышение напряженности слабо влияет на выпадение осадка.

4. Наблюдается, что с помощью магнитной обработки может быть достигнут устойчивый эффект диспергирования элементов горной породы в составе композиций с дисперсной минеральной фазой. Так при воздействии магнитным полем напряженностью 120 кА/м на композицию водной суспензии с частицами-обломками песчаника среднечисленный диаметр частиц уменьшается в 1,5 раза, при воздействии на композицию нефти с частицами-обломками песчаника среднечисленный диаметр частиц уменьшается в 1,36 раза.

5. Опытным путем показано, что с помощью воздействия магнитным полем в интервале от 5 до 15 секунд снижается вязкость нефти исследуемых образцов до 40%, а изменение напряженности от 30 до 120 кА/м приводит к снижению вязкости до 34%. Зависимость изменения вязкости нефти от напряжённости магнитного воздействия выражена слабее, чем от длительности контакта.

6. Полученные результаты наших лабораторных экспериментов позволяют сделать утверждение, что при воздействии магнитного поля на ОНФ-системы изменяются процессы формирования структурообразования. Данный эффект может рассматриваться как возможность уменьшения отрицательного воздействия от пескопроявления и солеотложения на работу УЭЦН при воздействии магнитным полем на добываемый флюид.

7. На основании подходов термодинамики и теории поля предложена гипотеза о механизме магнитного воздействия на ОНФ - системы.

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ОНФ-СИСТЕМАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Как указывалось, ранее (главы 1-3), прогресс магнитных методов в нефтедобыче, а также в других сферах применения ограничен уровнем понимания природы механизмов взаимодействия магнитного поля со средой воздействия. Указанный уровень обусловлен как научным, так и экспериментальным знанием механизмов взаимодействия магнитного поля со средой воздействия. В случае нефтяных систем, и в частности, ОНФ-систем, существуют методологические вопросы построения плана исследований, связанные со сложностью воспроизведения условий взаимодействия магнитного поля с нефтяными осложненными флюидами, поскольку это взаимодействие протекает на большой глубине, где затруднительно или невозможно организовать выполнение прямых измерений основных параметров. Нами предлагается следующая методология исследования магнитного воздействия на ОНФ - системы представлена на рис. 4.1.

Системность методологии обеспечивается использованием принципов постепенного перехода от относительно простых сред – (искусственных образцов) - к средам высокой сложности - реальным представителям ОНФ-осложнений. Опыты на лабораторном оборудовании на искусственных образцах позволяют обеспечить базовое требование испытаний - устойчивость и воспроизводимость результатов. На следующем этапе испытаний - при исследовании реальных объектов - устанавливается насколько закономерности, выявленные на искусственных образцах, воспроизводятся на природных средах.

На этапе исследования процессов формирования структурообразования в ОНФ-системах при магнитном воздействии решается задача обобщения данных экспериментальных исследований и формирование научно -

обоснованного целостного представления по механизму воздействия магнитного поля на определенные ОНФ- системы.



Рисунок 4.1 – Методология исследования магнитного воздействия на ОНФ- системы

После исследования принципов формирования структурообразования в ОНФ-системах при воздействии магнитным полем уточняются предполагаемые гипотезы. Заключительное подтверждение гипотез проводится после апробации предлагаемой технологии в реальных условиях месторождения посредством проведения опытно-промышленных испытаний. Стоит отметить, что экспериментальные методы верификации гипотез не входят в рамки данной научной работы.

4. 1 Исследование принципов и формирование предпосылок генерации дисперсной минеральной фазы (ДМФ)

4.1.1 Агломераты и зерна - основные элементы дисперсной минеральной фазы

Несмотря на большое число работ по пескопроявлению многие вопросы остаются не проясненными. Это утверждение может быть раскрыто на примере песчаника как наиболее распространенной породы, порождающей пескопроявление. Один из главных параметров песчаника - размер зерен структуры. Под зерном понимается элементарная микроструктурная единица породы, сохраняющая свою целостность в процессах разрушения породы. Относительно размеров зерен песчаников имеется широкий набор данных разных авторов. Так, Кузнецов В.Г. [94] указывает на размеры зерен (кристаллитов) от 5 до 2000 и более мкм, тогда как данные [87,95] относят песчаники к существенно более тонким зернам.

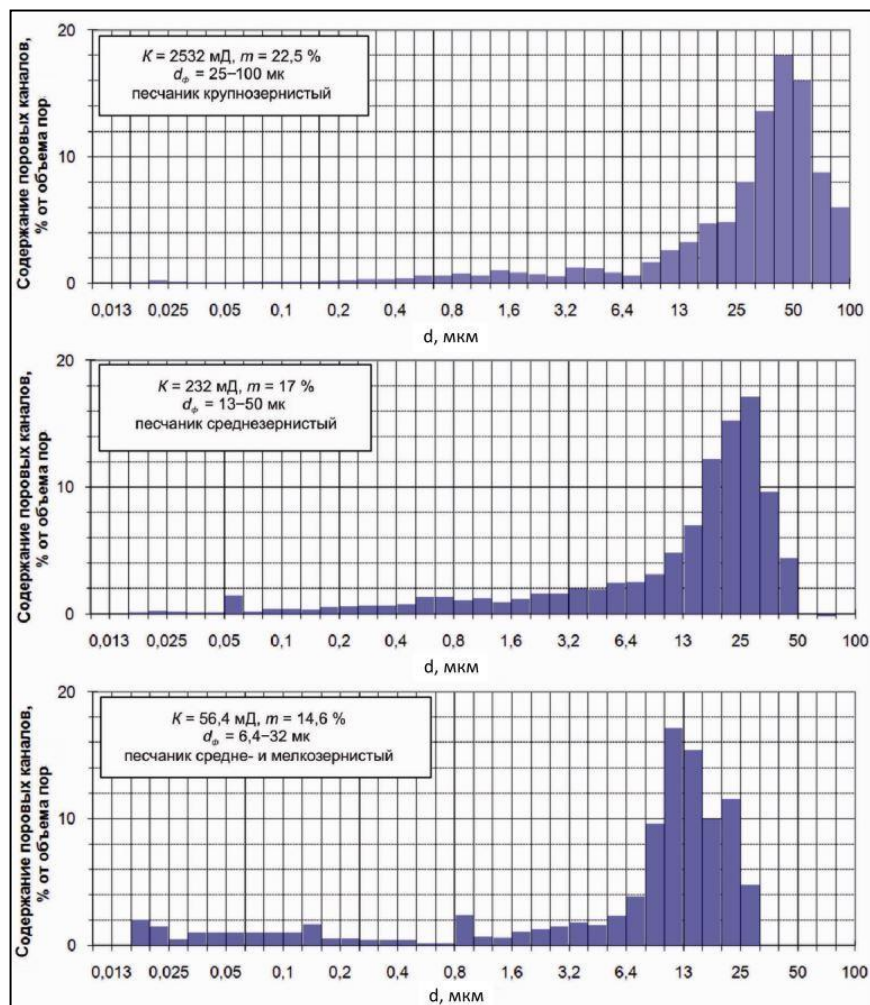


Рисунок 4.2 – Распределение пор в песчанике по диаметру [94]

Следует отметить, что в [87,95] приводятся данные по распределению пор в песчанике, и прямое соотнесение размеров пор и зерен требует пояснения, которое представлено ниже.

Определим размеры пор по типам одинаковых по размеру зерен в модели.

Радиус межзеренной поры $R_{мз}$, образованной тремя соприкасающимися зернами - сферами с радиусом r_k (рис. 4.3):

$$R_{мз} \approx 0,155r_k \quad (4.1).$$

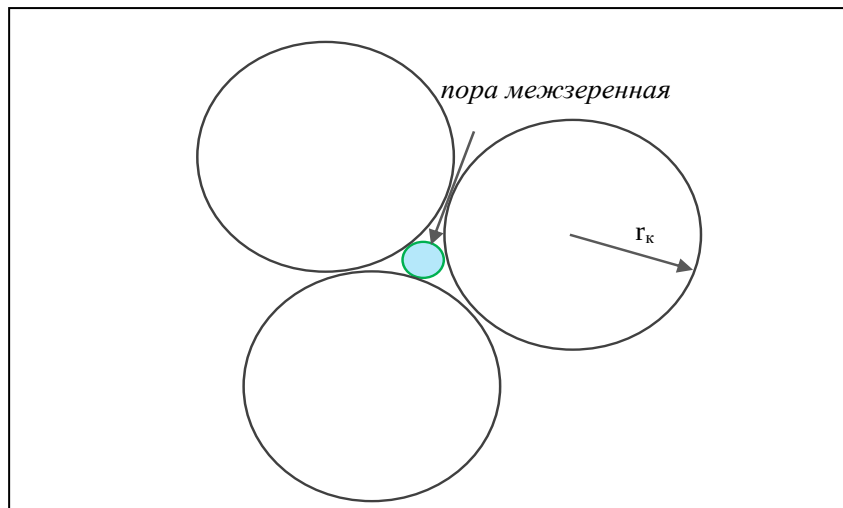


Рисунок 4.3 – Пора межзеренная

Таким образом, размер поры в 6-7 раз меньше размера зерна.

В настоящее время отсутствует четкое понятие «зерна» горной породы, что имеет негативные последствия при исследовании пескопроявлений и процессов генерации ДМФ.

Вследствие крайне широкого разнообразия горных пород - их свойств, способности к разрушению, а также многообразия факторов воздействия на породы - их разрушение может проходить по множеству вариантов, и заканчиваться на стадии далекой до полного разрушения, которое отвечает отсутствию агломератов и зеренному состоянию, рис. 4.4.

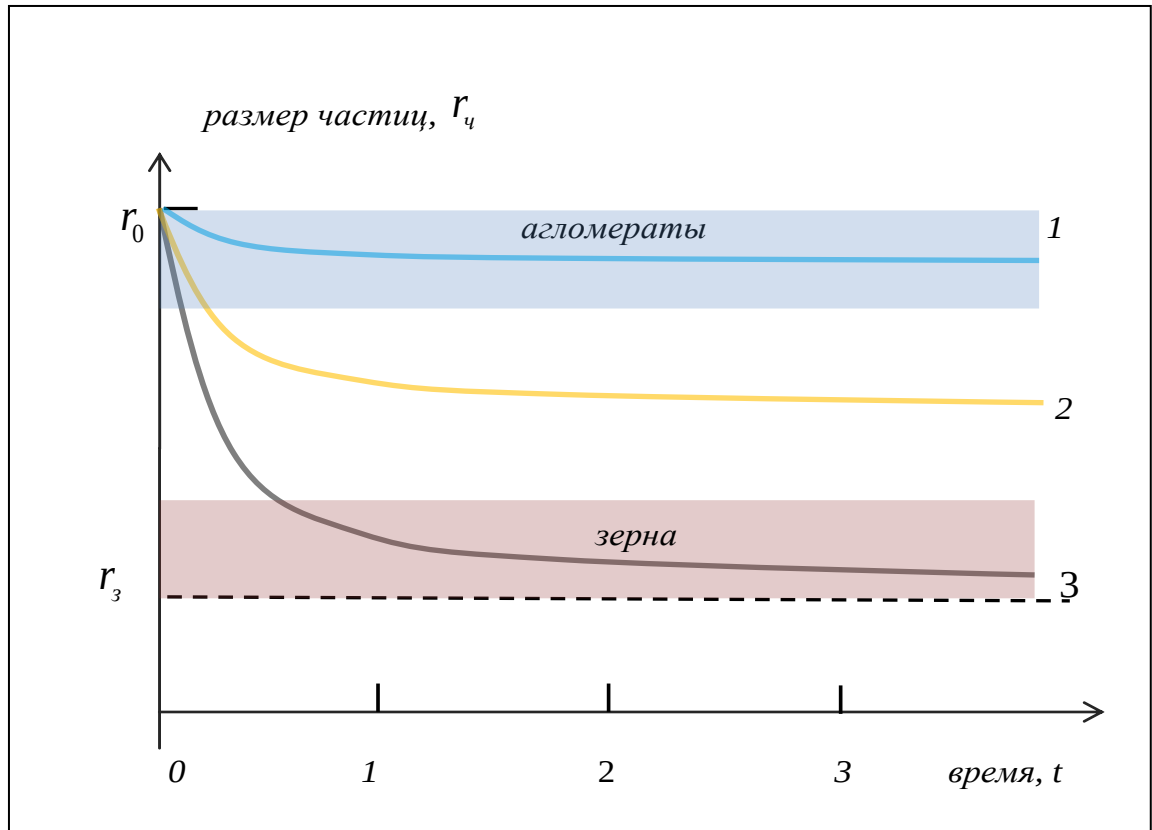


Рисунок 4.4 – Диаграмма разрушения и диспергирования породы: 1- малая скорость диспергирования; 2- средняя скорость диспергирования; 3- высокая скорость диспергирования

Полное разрушение до монозерен практически недостижимо, поэтому на любой стадии диспергирования дисперсная фаза состоит из композиции агломератов и зерен. В верхней части диаграммы в области крупных размеров частиц располагается зона агломератов, r_0 - условный начальный размер породы, который отвечает размеру изучаемого объекта породы и может иметь значительные размеры. Если в ходе разрушения и диспергирования породы размеры частиц остаются в зоне агломератов, это значит, что степень разрушения малая, и новые поверхности не образуются или создаются в малой степени (рис. 4.4, кривая 1). Если же разрушение и диспергирование породы имеет высокодинамический и интенсивный

характер, то это отвечает достаточно быстрому переходу породы из зоны агломератов в зону зерен (рис. 4.4, кривая 3).

Процесс разрушения и диспергирования породы и диспергирования частиц происходит по этапам:

- первоначально порода под действием комплекса нагрузок и воздействий разрушается на максимально крупные обломки;
- на следующей стадии происходит разрушение обломков в результате их движения в динамическом флюиде (вода, нефть);
- указанное разрушение обломков имеет место по причине столкновения обломков друг с другом и деформационных напряжений в вязкой среде, а также химического растворения глинистого цемента;
- на третьей стадии диспергирование обломков идет по причине воздействия на них со стороны узлов и установок нефтегазодобычи.

Для аналитического и количественного описания разрушения и диспергирования породы необходимо использование группы параметров определения размеров частиц.

4.1.2 Трёхуровневый метод определения средних диаметров частиц: среднечисленный, среднеповерхностный и среднемассовый диаметр

При решении актуальных задач пескопроявления недостаточно, как это принято, использования среднечисленного диаметра частиц, а требуется применение более полного и глубокого инструментария - трехуровневого комплекса средних параметров частиц, включающего характеристики размеров частиц линейного, поверхностного и объемного измерения:

- среднечисленный диаметр - измерение первого порядка (линейное);
- среднеповерхностный диаметр - измерение второго порядка;
- среднемассовый диаметр - измерение третьего порядка.

Одновременное знание характеристик частиц на трех уровнях позволяет получить всесторонний объем информации о геометрических свойствах дисперсной минеральной фазы [96, 97], а также выполнить аналитические оценки динамических и кинетических процессов пескопроявления.

Для определения средних диаметров частиц применимы соотношения [98]:

- среднечисленный диаметр:

$$\bar{d}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i}{\sum_{i=1}^n n_i} \quad (4.2),$$

- среднеповерхностный диаметр:

$$\bar{d}_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i^2}{\sum_{i=1}^n n_i}} \quad (4.3),$$

- среднемассовый диаметр:

$$\bar{d}_3 = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^n n_i}} \quad (4.4),$$

где d_i - диаметр частицы в i -ом диапазоне гистограммы распределения; n_i - количество частиц в i -й фракции.

Соотношения (4.2) – (4.4) составляют основу трехуровневого комплекса средних параметров частиц пород.

Методически корректное измерение средних диаметров частиц пород представляет собой сложную задачу, поскольку предполагает одновременное нахождение параметров частиц в широком диапазоне параметров, что затруднительно выполнить одним методом - оптической микроскопии, сканирующей микроскопии, ситовым методом, электронной микроскопии и

др. Особые трудности возникают, если дисперсная среда содержит одновременно тонкие коллоидные частицы и относительно крупные частицы размеров более 1 мкм.

В табл. 4.1 приведены данные по параметрам модельного объекта-интервалом диаметров, средним диаметром по интервалу и количеству частиц в i -ом интервале, а также по рассчитанным по соотношениям (4.2) - (4.4) средним диаметрам.

Использованы симметричные с малой дисперсией гистограммы распределения по диаметру с одинаковыми левыми и правыми ветвями и явно выраженным центром в интервале 3-4 мкм. Пространственный показатель измерения составляет: для среднечисленного измерения - 1, для среднеповерхностного измерения - 2, для среднемассового измерения - 3.

Таблица 4.1 – Данные по параметрам модельного объекта

Интервал диаметров, мкм	0...1	1...2	2...3	3...4	4...5	5...6	6...7
Средний диаметр по интервалу, d_i	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5
Количество частиц в i -ом интервале, n_i	1	5	18	52	18	5	1
Рассчитанные средние диаметры, мкм							
Среднечисленный диаметр	$\bar{d}_1 = 3,5$						
Среднеповерхностный диаметр	$\bar{d}_2 = 3,63$						
Среднемассовый диаметр	$\bar{d}_3 = 3,74$						

На рис. 4.5 показаны графические интерпретации распределений по параметрам: среднечисленный, среднеповерхностный и среднемассовый диаметры.

Как следует из табл. 4.1 и рис. 4.5, отмечаются следующие особенности симметричных кривых с малой дисперсией гистограммы распределения по диаметру:

- средний диаметр дисперсной среды увеличивается с ростом числа измерений- от среднечисленного (одно измерение) до среднемассового диаметра (три измерения), что обусловлено увеличением статистического веса частиц большого размера в случае среднеповерхностного и среднемассового измерения;
- с ростом числа измерений имеет место снижение статистического веса в зоне центра распределения и уширение кривой распределения, что означает увеличение дисперсии распределения.

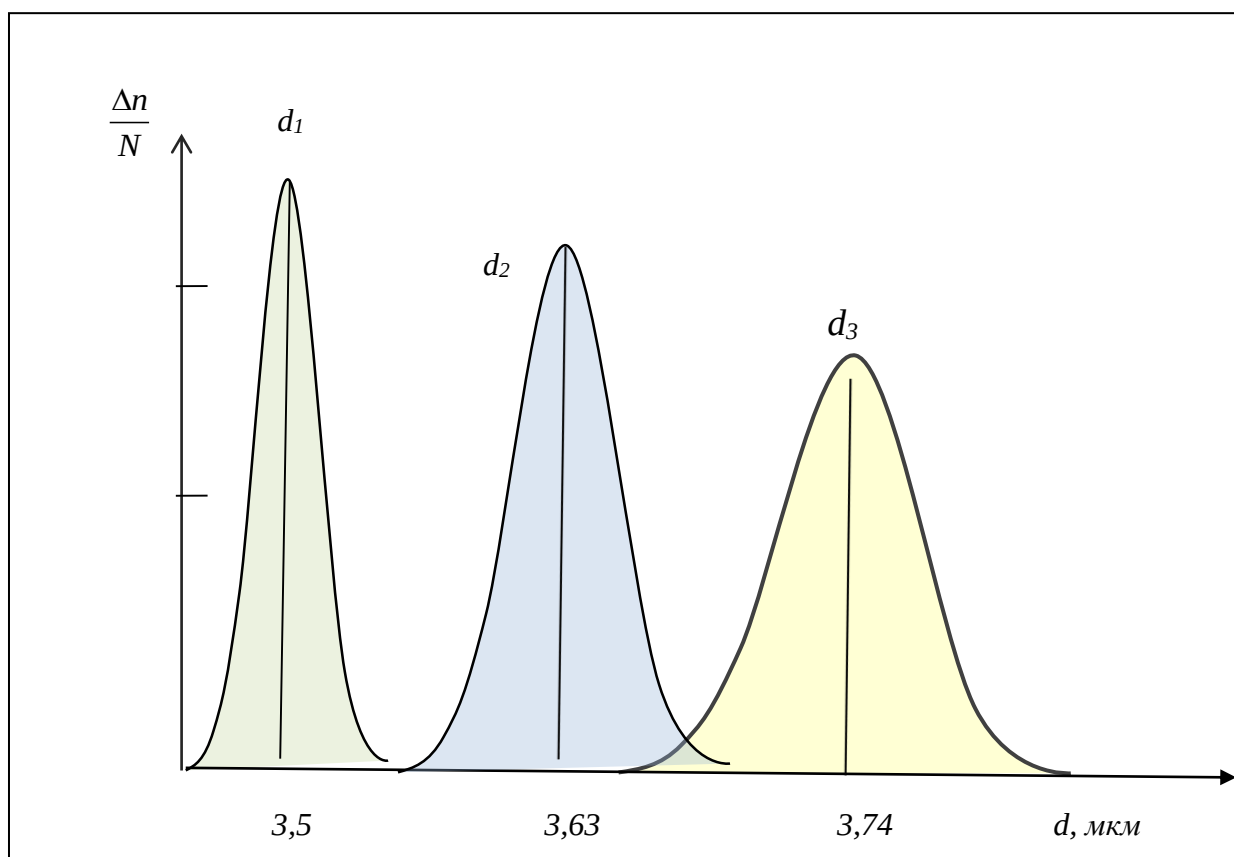


Рисунок 4.5 – Графические интерпретации распределений по диаметрам: среднечисленный, среднеповерхностный и среднемассовый диаметры

Рассмотрим несимметричное распределение с большей дисперсией (табл. 4.2), чем для модельного объекта с характеристиками, приведенными в табл. 4.1.

Отличие несимметричного распределения от симметричного состоит в том, что численная доля частиц с диаметром в интервале 6-7 мкм составляет 10%, что в 10 раз выше, чем для симметричного распределения.

Таблица 4.2 – Данные по параметрам модельного объекта несимметричного распределения

Интервал диаметров, мкм	0...1	1...2	2...3	3...4	4...5	5...6	6...7
Средний диаметр по интервалу, d_i	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5
Количество частиц в i -ом интервале, n_i	1	5	18	52	8	5	10
Рассчитанные средние диаметры, мкм							
Среднечисленный диаметр	$\bar{d}_1 = 3,63$						
Среднеповерхностный диаметр	$\bar{d}_2 = 3,87$						
Среднемассовый диаметр	$\bar{d}_3 = 4,26$						

Сопоставление данных для симметричного и несимметричного распределений показывает, что:

- для несимметричных распределений по отношению к симметричному распределению наблюдается смещение оценок диаметра $\bar{d}_i$ в сторону больших значений, при этом с ростом пространственного показателя степень смещения усиливается;
- для несимметричного распределения статистическая доля крупных частиц растет с ростом пространственного показателя и для среднемассового измерения для частиц 6-7 мкм составляет 35,5 % при их численной доле 10%.

Таким образом, среднемассовое измерение позволяет получить наиболее точные оценки размеров для крупных частиц, что представляет

особый интерес при исследовании воздействия магнитного поля на диспергирование минеральных агломератов.

Описание процессов разрушения и диспергирования породы в терминах и параметрах создания новых поверхностей имеет принципиальное значение и позволяет поставить задачу выяснения природы разрушения и диспергирования породы при воздействии магнитного поля на песчаные породы. Для решения указанной задачи рассмотрим модели песчаника.

4.2 Физико - механическая модель песчаника

Физико - механическая модель песчаника разработана на основании анализа совокупности данных, включающих:

- экспериментальные исследования песчанистых пород, выполненные в настоящей работе (глава 3);
- экспериментальные и теоретические исследования по механизмам разрушения песчаника, представленные ранее (глава 3) и выполненные разными авторами;
- методологические принципы и предпосылки построения физико-механических принципов генерации ДМФ, выполненные в настоящей работе.

На рис. 4.6 показана физико- механическая модель песчаника с гетерогенными частицами зерна- агломераты.

Песчаник состоит из трех компонентов - минеральных частиц (песчинок), цемента-глинистого вещества, с помощью которого осуществляется связь между частицами песка, и порового пространства, заполненного в той или иной степени поровой водой.

В водонасыщенном песчанике вода занимает все поровое пространство, а неводонасыщенном - только определённую его долю.

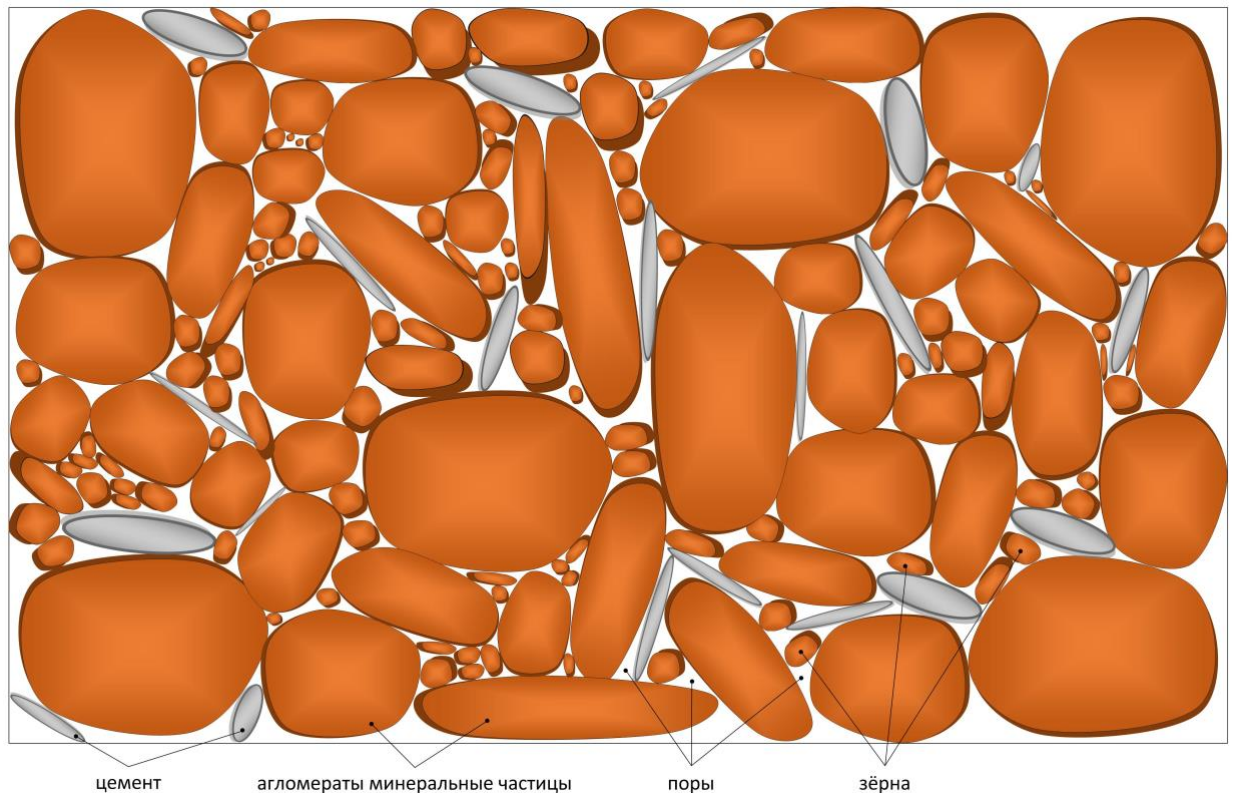


Рисунок 4.6 – Модель песчаника с гетерогенными частицами зерна-агломераты

Минеральная фаза песчаника представлена агломерированными частицами и зёрнами. Агломерированные частицы воспроизводят структуру песчаника в малой пространственной форме и состоят из минеральных частиц и цемента, рис. 4.7.

Размещение минеральной фазы и цемента по объему имеет неупорядоченную хаотическую форму, что предопределяет такие свойства песчанистой породы как неоднородность, неопределённость и нечеткость.

Неравномерность распределения цемента как скрепляющего и обеспечивающего прочность компонента по объему породы приводит к неравнопрочности материала, и образованию областей повышенной прочности в местах концентрирования цемента, и зон ослабления в местах обеднения цемента. Ослабленные зоны могут рассматриваться в качестве дефектных областей, через которые будет проходить разрушение песчаника.

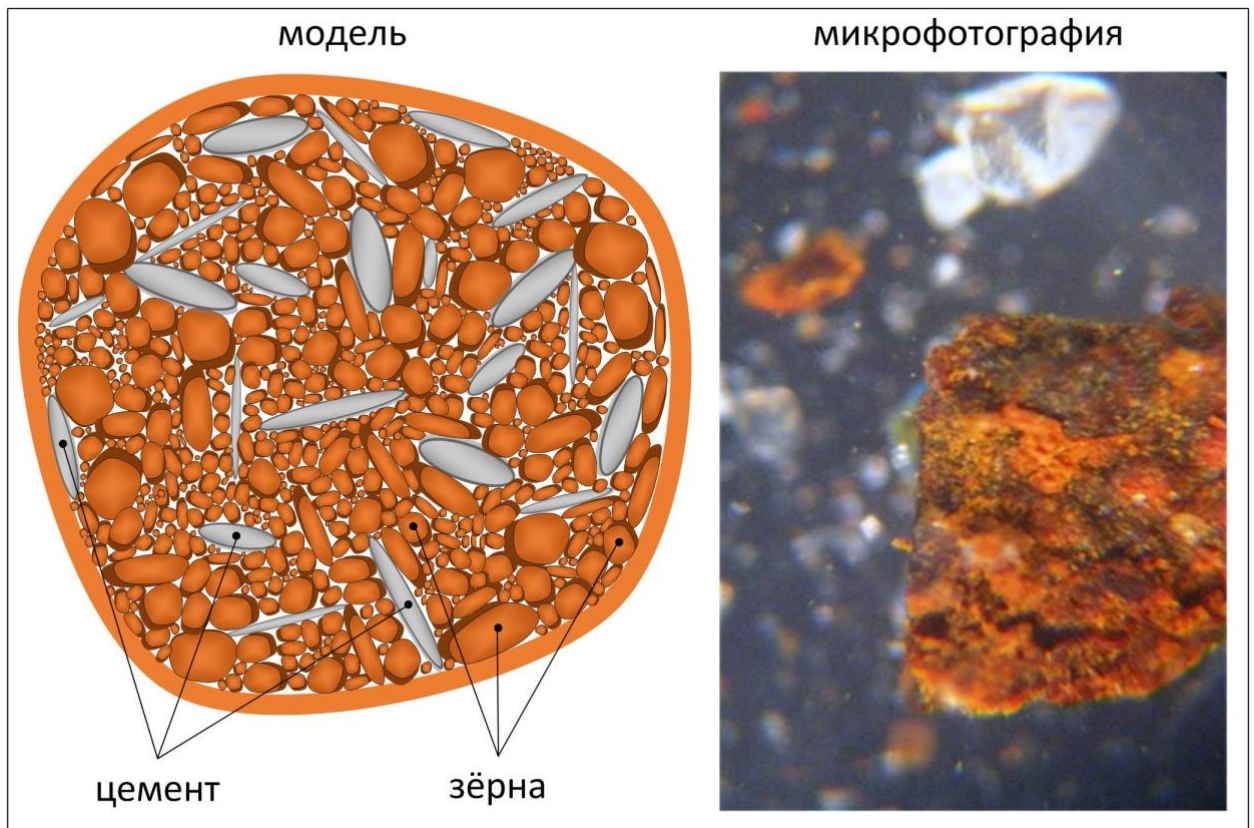


Рисунок 4.7 – Структура агломерата

Формирование агломератов может быть следствием неравномерности распределения цемента, когда зёрна породы скрепляются значительным количеством цемента, и образуют устойчивые к внешним воздействиям области.

Песчаник как многие горные породы относится к неоднородным системам и характеризуется масштабным эффектом [99-102]. Масштабный эффект - феномен изменения каких-либо свойств материала при варьировании размеров (масштаба) исследуемой области или образцов.

Как физическое тело песчаник близок поликристаллическому телу, в котором зерна имеют существенно большую прочность, чем межзеренные пограничные области. Разрушение поликристалла идет по межзеренным областям. В песчанике также плотность и прочность зерен- песчинок выше, чем цементирующей фазы. Помимо этого, как дисперсная пористая структура песчаник имеет наряду со слабыми элементами по границам

минеральная частица- цемент еще ослабленные зоны на границе частица – пора.

Модель песчаника включает такие показатели как компонентный состав, структура, параметры и свойства:

- компоненты- минеральные частицы, глинистая связка и поровая вода;
- минеральная фаза представлена агломератами и зернами, характеризующиеся определенной пропорцией тех и других, а также их размерами;
- физические параметры песчаника - объемная и массовая доли минеральных частиц, глинистой связки и воды;
- показатели прочности отличаются на разных уровнях- внутри агломератов и вне их- статистические и вероятностные характеристики;
- минеральные частицы нерастворимы в воде, а глинистая связка обладает определенной способностью к растворимости, что приводит к инициации разрушения породы;
- параметры песчаника как дисперсной структуры- плотность и пористость песчаника, плотность твердой и жидкой фаз;
- параметры и структура минеральных частиц- размер и форма;
- распределение частиц по размерам;
- характеристики хрупкости и пластичности;
- характер разрушения;
- размер пор, образованных минеральными частицами.

Физико - механическая природа песчаника выражается через взаимодействие глинистого цемента связующего с минеральной фазой и поровой жидкостью с следующими признаками:

- целостность песчаника обеспечиваемая исключительно глинистым цементом, сцепляющим минеральные частицы в пространственную структуру;

- характеристики прочности контакта на границе раздела минеральная фаза- глинистые соединения высоко вариативны;
- взаимодействие глинистого связующего цемента с поровой жидкостью приводит к растворению и вымыванию связки из узлов, что вызывает потерю целостности породы на микроуровне, а в последствии и на макроуровнях породы.

Процессы разрушения и диспергирования песчаника протекают по механизмам, описанным П. А. Ребиндером, по которым понижение прочности тела происходит вследствие физико-химических процессов, вызывающих уменьшение поверхностной (межфазной) энергии тела [90].

Природа связей в горных породах

В горных породах имеют место контакты минеральных частиц разной природы.

Сила f_c и энергия E_c взаимодействия в контактах между частицами зависят от вида (природы) контактов (рис. 4.8):

- непосредственных (атомных), возникающих в высокодисперсных грунтах ($f_c \approx 10^{-8} - 10^{-7}$ Н, энергия сцепления $E_c \approx 10^{-17} - 10^{-16}$ Дж);
- коагуляционных, возникающих в пастах (суспензиях) или эмульсиях через тонкую прослойку жидкости ($f_c \approx 10^{-10} - 10^{-8}$ Н, $E_c \approx 10^{-19} - 10^{-18}$ Дж);
- прочных, так называемых фазовых контактов, характерных для конденсационных структур дисперсных материалов ($f_c \approx 10^{-7} - 10^{-6}$ Н, $E_c \approx 10^{-17} - 10^{-16}$ Дж) [52].

По мере ослабления породы характер контактов меняется от прочных фазовых до неустойчивых коагуляционных.

Характер контактов глинистого цемента с минеральной фазой непосредственно связан с особыми свойствами глинистого компонента.

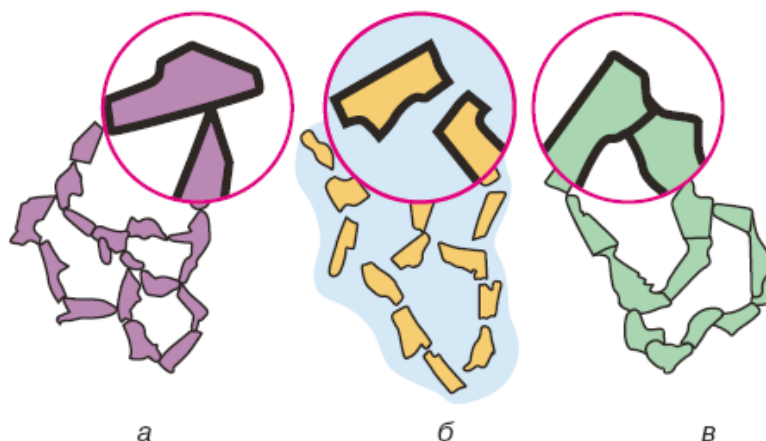


Рисунок 4.8 – Основные виды контактов между частицами дисперсных фаз, образующихся в дисперсных системах согласно классификации П.А. Ребиндера [90]: а – непосредственный – атомный (в порошках), б – коагуляционный (в пастах и суспензиях), в – фазовый (в дисперсных материалах)

Глины имеют высокое сродство к воде, и способны создавать сложные комплексы гидроалюмосиликатного и иного состава [103-105]. Основу глин составляют оксидные и гидроксидные соединения алюминия и кремния, которые обладают химическими и кристаллохимическими свойствами, обуславливающими высокое сродство глин к воде.

Так, в ряду $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ существует большое число гидратированных соединений:

- бемит – $\gamma\text{-AlO(OH)}$;
- гидраргиллит – $\gamma\text{-Al(OH)}_3$;
- гидроксид – Al(OH)_3 и другие.

Высокогидратированные глины имеют сложную структуру поверхностной воды, рис. 4.9 [103]. Виды связанной воды: прочносвязанная (адсорбционная); рыхлосвязанная (осмотически поглощенная): вторичноориентированная, осмотическая и свободная.

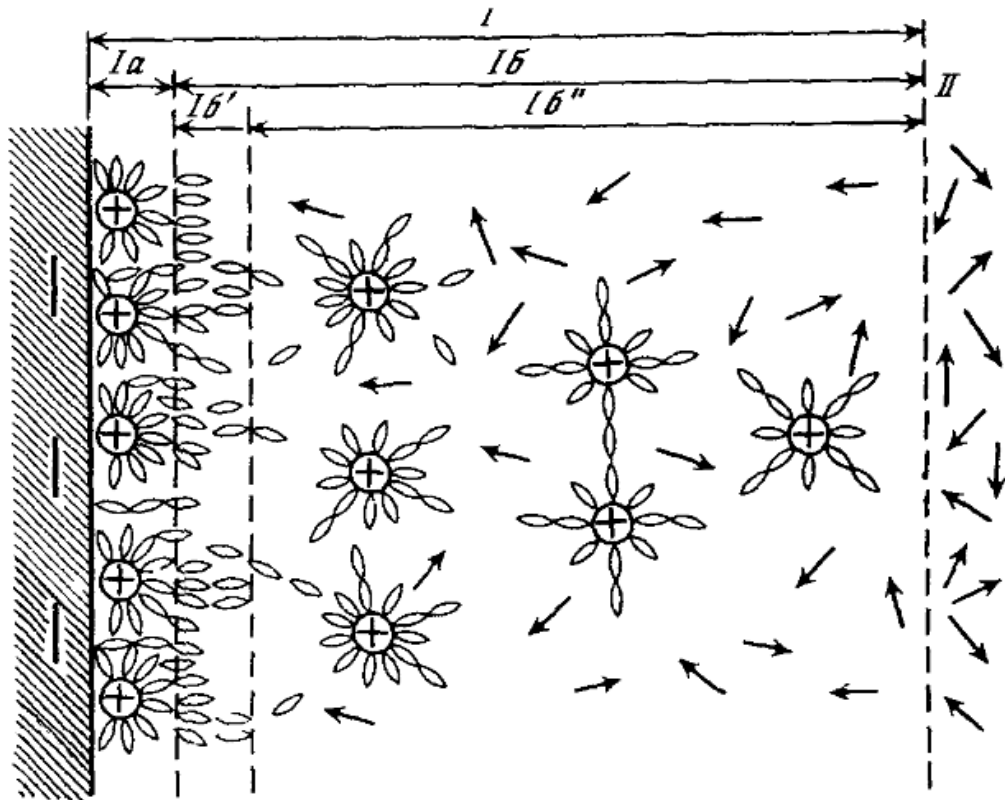


Рисунок 4.9 – Схема строения связанной воды в глинах по Е. Ж. Сергееву [103]: I - связанная: 1а - прочносвязанная (адсорбционная), 1б - рыхлосвязанная (осмотически поглощенная): 1б' - вторичноориентированная, 1б'' — осмотическая; II — свободная

Чем выше степень гидратации поверхности глинистых частиц, тем слабее связь на границе минеральная частица- глинистый цемент. По мере роста слоя поверхностной воды имеет место расклинивающий эффект, состоящий в удалении поверхности минеральной частицы от глинистой подложки. При некоторой критической толщине связанной воды глинистый цемент перестает выполнять функцию удержания минеральных частиц, и наступает условие локального распада песчаника.

Разрушение как породы в целом, так и агломератов происходит по механизму слабого звена, под которыми понимаются дефекты минеральных дисперсных агломератов – слабые контактные связи между зернами. По причине высокой неоднородности и прочности контактов песчаника

определенная часть контактов будет иметь достаточно малую прочность, и служить теми слабыми звеньями, через которые будет проходить разрушение породы.

В научном труде [106] разработаны методы пневмоимпульсного измельчения материалов с целью измельчения и дезагрегации их до тонкодисперсных порошков различного целевого назначения. В качестве рабочей среды воздействия использовали воздух или газ. Разупрочнение исследуемого материала происходит за счёт работы аэромеханических сил и ударного взаимодействия с отбойной поверхностью.

В [107] исследовали разупрочнение минералов с помощью магнитоимпульсной обработки.

На рис. 4.10 представлена модель роста трещины под действием электрического поля.

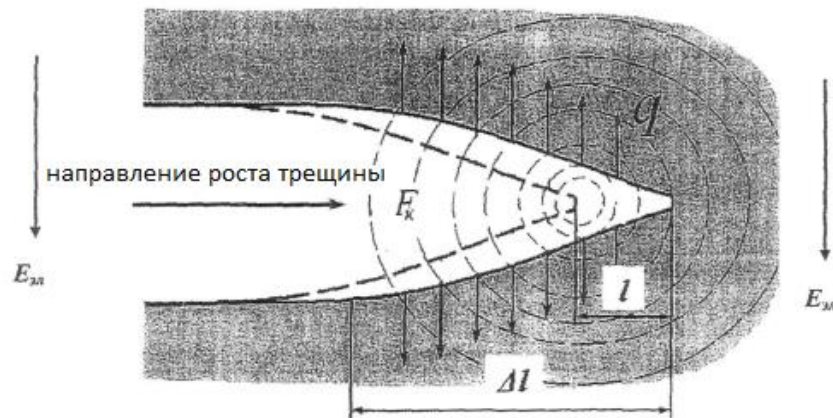


Рисунок 4.10 – Модель роста трещины под действием электрического поля [107]

Энергию электрического поля определяют, как работу по разведению заряженных берегов трещины:

$$A_{эл} = 2 \cdot \bar{q} \cdot \Delta l \cdot U \cdot E \quad (4.5)$$

,где $\bar{q}$ - линейный заряд в устье трещины, Кл/м; Δl - длина заряженной части устья трещины, м; U - раскрытие между берегами в устье трещины, м; E -

напряженность электрического поля при электромагнитном воздействии, В/м.

Стоит отметить, что в данной работе выполнялись исследования по разрушению однородного материала, в то время как в нашем диссертационном исследовании выполняется разрушение агломерированных комплексов. В [107] отмечено, что процесс разрушения твердого тела не является лишь чисто механическим процессом, а сопровождается в большей или меньшей степени электрофизическими и физико-химическими явлениями.

Явление, представляющее особый интерес рассмотрено в [108], где описывается намагниченность скважинной продукции палеозойских отложений за счёт породообразующих ожелезнённых минералов (сидерит и анкерит), которые отличаются своей естественной намагниченностью. Вследствие контакта намагниченной продукции и горной породы с подземным оборудованием скважины возникает намагниченность самого оборудования. Соответственно можно предполагать, что диспергирование горной породы такого состава необходимо рассматривать как частный случай, к которому не применимы предлагаемые подходы данной работы.

Энергетический подход к описанию разрушения пород рассмотрен ниже.

Термодинамический подход при описании магнитного воздействия на минеральную композицию агломераты - зерна

Как указывалось, ранее (глава 3), в случае пескопроявления (генерация дисперсной минеральной фазы) есть основания считать, что конденсация магнитной энергии происходит на дефектных областях - границах агломератов, что приводит к диспергированию данных образований.

Логически эта гипотеза подтверждается тем, что глинистый цемент – единственная сила, обеспечивающая физическую целостность песчаника, и

поэтому его разрушение может быть достигнуто только нарушением связи между зернами.

Выделим мысленную термодинамическую систему из ДМФ, состоящей из агломератов и зерен, и движущуюся в составе нефтяного флюида. На ДМФ направлен поток магнитной энергии с параметрами, обеспечивающими высокую эффективность диспергирования агломератов.

Рассмотрим более подробно песчаник в стадии множественного разрушения, под которым понимается такое его состояние, когда процессы разрушения имеют необратимый характер и происходят одновременно в разных локальных областях породы. Такое состояние песчаника возможно в случае интенсивного воздействия на породу со стороны пластовой воды, когда в результате проникновения воды по порам породы идет вымывание связки из узлов структуры. Другие возможные причины множественного разрушения песчаника- слабосцементированный коллектор, напряжения в призабойной зоне пласта; волновые воздействия и др.- также могут вызывать эффект множественного разрушения породы.

В итоге указанных воздействий на песчаник его контактная пространственная сеть подрывается, и образующиеся агломераты имеют пониженную прочность, и способны к дальнейшему диспергированию магнитным полем, посредством воздействия на связующее звено агломератов – глинистого цемента.

Термодинамический подход при описании магнитного воздействия на минеральную композицию агломераты- зерна заключается в следующем.

Для свободной энергии Гельмгольца системы с постоянным числом частиц выполняется соотношение [109, 110]:

$$F = U - TS \quad (4.6)$$

,где U - внутренняя энергия; T - абсолютная температура; S - энтропия.

Отсюда дифференциал свободной энергии равен:

$$dF = d(U - TS) = \delta Q - \delta A - d(TS) = -PdV - SdT \quad (4.7).$$

Видно, что это выражение является полным дифференциалом относительно независимых переменных температуры T и объема V . Для системы с переменным числом частиц дифференциал свободной энергии Гельмгольца записывается в виде:

$$dF = -PdV - SdT + \mu dN \quad (4.8)$$

,где μ - химический потенциал, а N - число частиц в системе.

При магнитном воздействии имеет место увеличение свободной энергии Гельмгольца за счет роста общей поверхности частиц породы в результате роста числа частиц. Та часть магнитной энергии, которая не расходуется на полезную работу диспергирования агломератов и образование новых частиц может переходить в тепловую энергию, что ведет к росту энтропии системы.

Задача эффективной магнитной технологии заключается в том, чтобы обеспечить максимальный уровень полезно затрачиваемой энергии.

Что касается вопроса о природе взаимодействия магнитной энергии с дефектными контактными областями поверхность минеральной частицы-глинистая связка, то можно указать, что этот вопрос не входит в число задач настоящей работы. Возможно, что в результате магнитного воздействия на контактные области имеет место разрушение части компенсированных химических связей и образование активных ненасыщенных связей, способных к взаимодействию с магнитным полем, энергия которого затрачивается на полный разрыв контактных связей, что ведет к диспергированию породы.

4.3 Исследование принципов и формирование предпосылок процесса структурообразования солеотложения при магнитном воздействии

Проблема солеотложения в нефтедобыче имеет несколько самостоятельных аспектов:

- практическая задача управления процессами солеотложения как условие повышения эффективности нефтедобычи [75, 111];
- общие принципы, методы, технологии и мероприятия по решению задачи управления процессами солеотложения [111,112];
- научные основы и принципы моделирования солеотложения.

Существующие проблемы с решением задач управления процессами солеотложения связаны с тем, что основные усилия ученых и инженеров сосредоточены на методах, технологиях и мероприятиях по недопущению солеотложения, тогда как вопросам исследования научных основ солеотложения не уделяется достаточно внимания.

В рамках задач настоящей работы представляет интерес разработка принципов формирования солеотложения при магнитном воздействии.

Рассмотрим некоторые подходы к решению указанной задачи.

Процесс солеотложения характеризуется двумя основными стадиями:

- формирование зародышей кристаллизации;
- рост кристаллов и их конденсация [77].

К основателям теории растворов относят Дж. Гиббса, Я. И. Френкеля, М. Фольмера, В. Г. Хлопина и других ученых.

На качественном уровне образование осадков солей в пересыщенных растворах начинается с формирования зародышей, которые становятся центрами кристаллизации и роста осадка. Пересыщенные растворы на протяжении некоторого времени могут оставаться стабильными, однако это состояние возможно только при небольших пересыщениях. При некотором пороговом превышении пересыщения наступает самопроизвольная кристаллизация. Таким образом, при достаточно высоком пересыщении скорость образования зародышей резко возрастает.

Фольмер для определения скорости образования зародышей предложил соотношение [77]:

$$I = K e^{-\frac{A}{kT}} \quad (4.9)$$

,где I - число равновесных зародышей, возникающих в единицу времени в единице объема; K - коэффициент пропорциональности; A - работа образования зародыша; k - постоянная Больцмана.

Я. И. Френкель усовершенствовал соотношение (4.9), введя в него параметр вязкости:

$$I = K^{II} e^{-\frac{U}{kT}} e^{-\frac{A}{kT}} \quad (4.10)$$

,где U - энергия активации, зависящая от вязкости.

Значение вязкости имеет особое значение в таких средах как нефтяные флюиды.

Пересыщенные растворы представляют собой гетерогенные на микроуровне системы, в которых наряду с растворенной фазой присутствуют ультрадисперсные частицы- предшественники зародышей. Указанные ультрадисперсные частицы вследствие трансляционного движения [51] способны к распаду, и новому воссозданию ультрамикроассоциатов.

Сами ультрамикроассоциаты представляют собой сборку некоторого числа гидратированных ионов. Движение гидратированных ионов в растворе имеет неупорядоченный характер, и, следовательно, образование ультрамикроассоциатов - случайное событие. Таким образом, образование зародышей имеет статистическую природу и может быть описано методами теории вероятностей.

Вместе с тем, механизм образования зародышей остается во многих отношениях противоречивым, что в значительной степени связано со сложностью структуры воды [113].

В вязкой среде нефтяных флюидов движение гидратированных ионов затруднено, и в случае возникновения ультрамикроассоциата его распад менее вероятен, чем в водной среде.

В условиях магнитного поля большое значение имеет заряд гидратированных ионов. В [114] предложены модели растворов электролитов: разбавленного и концентрированного раствора, рис. 4.11.

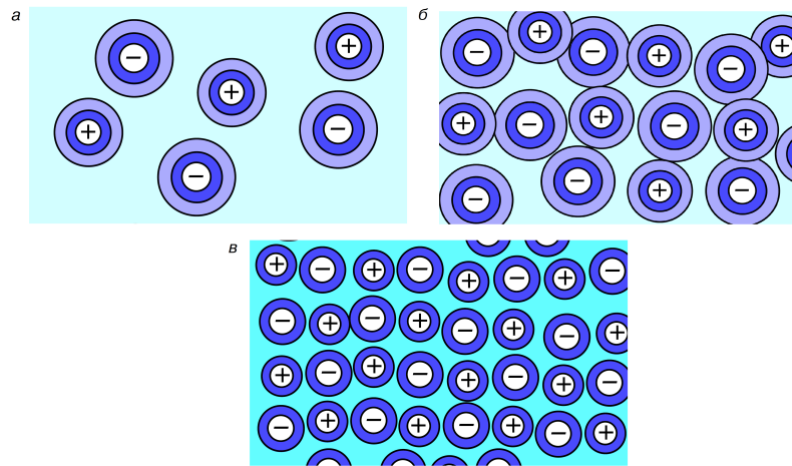


Рисунок 4.11 – Модели растворов электролитов: а - разбавленный раствор; б - граница свободной гидратации; в - концентрированный раствор

При некоторой предельной концентрации наступает предел свободной гидратации, и частицы приходят в соприкосновение, что предопределяет образование ультрамикроассоциатов.

В действительности строение более сложное, чем указано на рис. 4.11.

На рис. 4.12 показана структура коллоидной частицы.

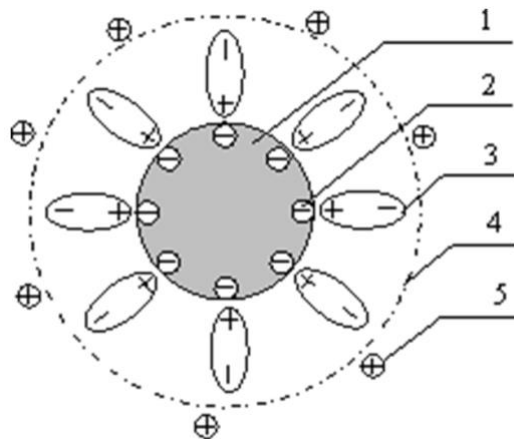


Рисунок 4.12 – Структура коллоидной частицы: 1 – коллоидная частица, 2 – потенциалопределяющие ионы, адсорбированные на поверхности частицы, 3 – сольватный слой ориентированных диполей (молекул воды) толщиной до нескольких сотен молекул, 4 – поверхность скольжения в дисперсионной среде, 5 – противоионы

Структура коллоидной частицы с развитой многоуровневой системой зарядов такова, что имеется перспектива для магнитного воздействия.

Ранее (глава 3) было экспериментально установлено, что магнитное воздействие ускоряет осаждение карбоната кальция.

Сам по себе этот результат оставляет пространство для интерпретаций:

- первая гипотеза- ускорение осаждения соли при магнитном воздействии может быть результатом роста числа зародышей, в этом случае интенсивность образования осадка лимитируется числом зародышей, и при малом числе зародышей массовая скорость образования конденсата мала;
- вторая гипотеза- ускорение осаждения соли при магнитном воздействии - следствие интенсификации процесса роста кристаллов при том же числе зародышей.

На рис. 4.13 приведены схемы образования конденсированной фазы при солеотложении, соответствующие двум приведённым гипотезам.

Согласно схеме А магнитная обработка приводит к множественному образованию зародышей, и конденсированная фаза состоит из кристаллов малого размера. В случае схемы Б число зародышей невелико, а магнитная энергия инициирует образование крупных кристаллов.

Приведенные гипотезы не противоречат представлениям коллоидной и физической химии, и в этом отношении могут быть признаны одинаково правомерными. С другой стороны, есть ряд экспериментальных данных [61], согласно которым магнитное поле ускоряет зародышеобразование. В то же время, как говорилось в главе 3, достаточных оснований утверждать, что указанный эффект имеет место пока еще нет. Есть обоснованные сомнения, что ускорение зародышеобразования благоприятствует сохранению тонкой структуры осадка и предотвращало бы образование крупных частиц, опасных для УЭЦН. Эти сомнения продиктованы возможностью ассоциации зародышей, и формированию достаточно крупных кристаллов в осадке.

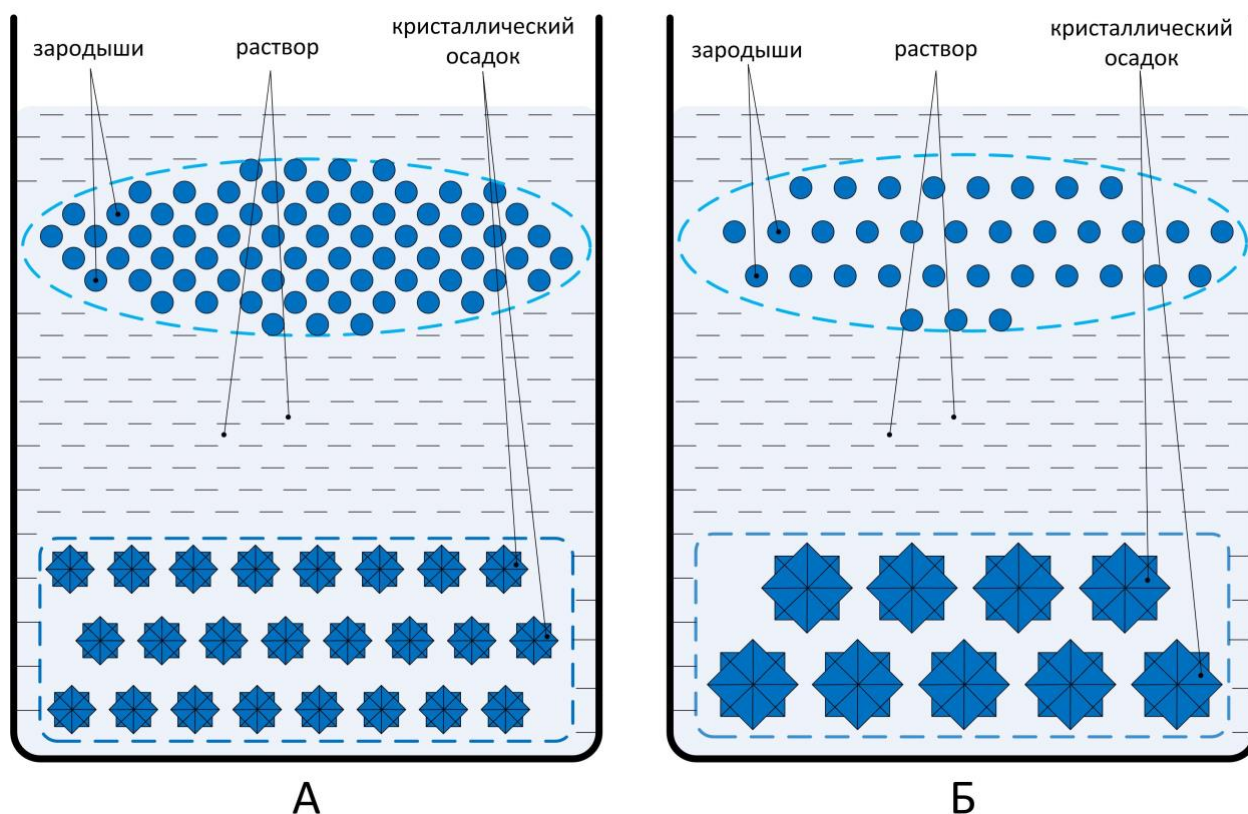


Рисунок 4.13 – Схема образования конденсированной фазы при солеотложении, соответствующая двум гипотезам: А- рост числа зародышей под воздействием магнитного поля; Б- рост конденсированной фазы под действием магнитного поля при малом числе зародышей

Сохранение тонкодисперсной структуры осадка в случае ускоренного магнитным полем зародышеобразования возможно, если зародыши в результате магнитного воздействия приобретут одинаковый заряд на поверхности, что обеспечит структурно-фазовую и размерную стабильность системы.

Представленные гипотезы могут рассматриваться в качестве законченного этапа по исследованию принципов формирования структурообразования солеотложения при магнитной обработке.

Проверка сформулированных гипотез выходит за рамки настоящей работы.

Таким образом, принципы формирования структурообразования солеотложения при магнитном воздействии включают позиции:

- в основе процессов структурообразования солеотложения лежит соотношение кинетики формирования зародышей и роста кристаллов, при этом магнитное поле может интенсифицировать эти процессы;
- сохранение тонкодисперсной структуры осадка в случае ускоренного магнитным полем зародышеобразования возможно, если зародыши в результате магнитного воздействия приобретут одинаковый заряд на поверхности;
- разработаны базовые схемы образования конденсированной фазы при солеотложении.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

1. Показано, что гранулометрический состав как один из главных параметров породы не имеет в настоящее время методического обеспечения, что препятствует изучению процессов разрушения и диспергирования породы.
2. Рассмотрен трехуровневый метод определения средних диаметров частиц: среднечисленный, среднеповерхностный и среднемассовый диаметры.
3. Предложена диаграмма разрушения и диспергирования пород.
4. Рассмотрена физико - механическая модель песчаника, с использованием которой представлены микроструктурные механизмы разрушения и диспергирования песчаника.
5. Предложены принципы термодинамического подхода при описании магнитного воздействия на минеральную композицию агломератов.
6. Рассмотрены принципы формирования структурообразования солеотложения при магнитном воздействии.
7. Разработаны базовые схемы образования конденсированной фазы при солеотложении.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МЕТОДОВ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ДОБЫВАЕМОГО ФЛЮИДА НА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

5.1 Обоснование выбора магнитотвердых материалов - источника магнитного поля для использования в компоновке с УЭЦН

При разработке устройства для воздействия магнитным полем важным моментом является выбор используемых постоянных магнитов. Для соответствия оптимальным условиям эксплуатации постоянные магниты должны обеспечивать требуемые параметры устройства и стабильность в условиях эксплуатации.

В работе [39] выполнен анализ и описание значительного количества устройств, предназначенных для предупреждения осложнений в нефтегазодобычи посредством воздействия магнитным полем.

На текущий момент производство постоянных магнитов осуществляется из следующих видов магнитотвердых материалов:

- литые магнитотвердые материалы;
- магнитотвердые ферриты;
- магнитотвердые материалы на основе сплавов редкоземельных металлов;
- композиционные магнитотвердые материалы.

Для подбора наиболее оптимальных магнитотвердых материалов для производства постоянных магнитов, учитываются следующие основные характеристики и параметры [115]:

- Остаточная магнитная индукция, B_R (Тл) - намагниченность, оставшаяся после намагничивания материала, из которого изготовлен постоянный магнит, измеренная на его поверхности, в

замкнутой системе. Это основная характеристика магнита. Иногда, эту величину называют - "сила магнита";

- Коэрцитивная сила по магнитной индукции, $H_{св}$ (кА/м) - величина внешнего магнитного поля, требуемого для полного размагничивания магнита, намагниченного до состояния насыщения. Характеризует устойчивость к размагничиванию (ГОСТ 19693);
- Максимальное энергетическое произведение, BH_{max} (Дж/м³) - мощность магнита;
- Температурный коэффициент остаточной магнитной индукции, α_t (%/°C) - характеризует изменение магнитной индукции от температуры;
- Максимальная рабочая температура, T_{max} (°C) - предел температуры, при которой магнит временно теряет часть своих магнитных свойств. При последующем охлаждении - все магнитные свойства восстанавливаются (в отличие от точки Кюри). Превышение нагрева на несколько десятков градусов больше T_{max} - может вызвать частичное размагничивание магнетика (после остывания, оставшаяся сила притяжения будет меньше изначальной; при этом, точные измерительные стрелочные приборы и т.п. - уже не годятся для работы).

Так же стоит отметить, что немаловажной характеристикой является стоимость магнитотвердых материалов, что в первую очередь определяет стоимость постоянных магнитов и как следствие устройств магнитной обработки.

В табл. 5.1 представлен сводный перечень основных характеристик и параметров магнитотвердых материалов. Самую низкую удельную стоимость имеют магниты из магнитотвердых ферритов, что и является причиной их широкого применения. Так же преимущественным достоинством данных

магнитов является высокая антикоррозионная устойчивость. Но даже при учёте ранее обозначенных преимуществ, магнитные свойства данных магнитов являются низкими, и для достижения нужных результатов необходимо значительное увеличение массогабаритных характеристик. Соответственно недостаток данных магнитов – значительное ограничение получения высоких параметров магнитного поля в необходимых конструкциях.

Магниты на основе Al-Ni-Co и Fe-Cr-Co имеют сравнительно невысокую коэрцитивную силу и соответственно низкую «мощность магнита». Наряду с этим стоит заметить, что данные материалы близки по стоимости к материалам на основе редкоземельных металлов.

Вследствие более высоких магнитных параметров материалов Sm-Co и Nd-Fe-B данные материалы являются более предпочтительными как источник магнитного поля при использовании в высокотехнологических системах для достижения наиболее значимых результатов. Очень высокие магнитные свойства и слабые температурные изменения намагниченности делают магниты из данных материалов очень перспективными для использования в нефтегазодобычи. Магниты из Nd-Fe-B являются дешевле, чем при использовании Sm-Co, и обеспечивают более высокие параметры в части магнитных свойств. Единственным серьезным негативным фактором является невысокая антикоррозионная устойчивость, но данный недостаток можно компенсировать при помощи легирования магнитов специальными добавками.

Учитывая большие возможности магнитов на основе материалов Nd-Fe-B, а так же получения высоких параметров при ограниченных массогабаритных размерах, данные магниты являются наиболее подходящими для использования с целью воздействия на перекачиваемый флюид в компоновке с УЭЦН.

Таблица 5.1 – Основные характеристики и параметры магнитотвердых материалов

Параметр	Вид магнитотвердых материалов					
	Литые материалы	Ферриты	Al-Ni-Co	Sm-Co	Fe-Cr-Co	Nd-Fe-B
Остаточная магнитная индукция B_r , Тл	0,7-1,2	0,24-0,43	0,75-1,4	0,75-1	1,1-1,5	0,9-1,2
Коэрцитивная сила по магнитной индукции $H_{св}$, кА/м	40-140	130-250	60-130	500-900	45-55	600-1000
Максимальное энергетическое произведения, $(BH)_{max}$, Дж/м ³	30-60	14-35	40-90	100-200	32-42	160-280
Температурный коэффициент намагниченности при $t_{комн}$ α_t , %/°C	0,01-0,04	0,2	0,03	0,04-0,05	0,025	0,07-0,1
Максимальная рабочая температура t_{max} , °C	300-350	250-300	550	200-300	350-400	100-200
Температура Кюри, °C	400	450	920	720	650	490
Плотность, кг/м ³	7200-7600	4700-5100	7300	8200-8300	7000-7650	7300-7500
Стоимость, доллар/кг	30	3	20	250	200	180
Стоимость, доллар/Дж	4,12	0,53	3,24	12,81	8,4	4,75

5.2 Разработка конструктивных особенностей эффективного применения источника магнитного воздействия в компоновке с УЭЦН

5.2.1 Анализ применяемых технологических решений по воздействию магнитным полем в компоновке с УЭЦН

При поиске конструкторских решений в части наиболее эффективного применения источника магнитного поля, для защиты погружного оборудования УЭЦН, был рассмотрен ряд предлагаемых решений на рынке нефтегазопромыслового оборудования.

Для снижения коррозионной активности перекачиваемого флюида, интенсивности АСПО и солеотложений, предотвращения образования эмульсий в ЭЦН и колонне НКТ, разработан магнитоактиватор для обработки флюида (патент РФ №38469) [116]. Данная разработка внедряется для нефтегазопромыслового комплекса инжиниринговой компанией ООО «ИК «Инкомп-нефть». Прибор имеет диапазон диаметров 73÷122 мм.

С целью предотвращения таких отрицательных факторов как АСПО в погружном оборудовании разработаны магнитоактиваторы «Магнолеум» и «МАГ–ЭЦН» [117]. В обоих приборах используются магнитные системы на основе редкоземельных металлов. Аппарат «МАГ-ЭЦН» разработан специально для применения с компоновкой УЭЦН, в свою основу включает магнитные элементы из магнитотвердых материалов «неодим-железо-бор». Магнитоактиватор крепится в компоновке с ЭЦН. На данных разработках специализируется ЗАО «Энергонефтемаш».

Предотвращение АПСО и уменьшение коррозионной активности нефти возможно при помощи скважинного или трубопроводного магнитоактиватора «МИОН» (магнитный индуктор обработки нефти) [118]. Данный прибор выполняется на основе магнитов из редкоземельных металлов (неодим-железо-бор). Данную разработку продвигает ООО «НПП

«Лантан-1», являющийся участником рынка по производству оборудования для борьбы с АСПО в нефтегазодобывающих скважинах.

Магнитные активаторы типа «МАС» и «МАГ» используются для борьбы с такими отрицательными факторами как АСПО и солеотложения. Результаты промышленного применения данной разработки показали в ряде случаев положительные результаты в виде увеличения наработки оборудования, сокращения количества промывок. Магнитоактиватор «МАГ» защищен патентом (патент РФ №41462) [119]. Данные технологии реализуется на нефтегазодобывающих производствах силами ООО «Сервис подземного оборудования» (ООО «Сервис ПО»).

Перечисленные разработки в разные периоды применялись в нефтегазопромысловой практике на различных предприятиях, но чётких установившихся положительных результатов во всех случаях получено не было.

В работе [63] отмечается, что эффективность магнитной обработки зависит от таких факторов, как время нахождения обрабатываемой жидкости в магнитном поле и скорости потока.

Недостатками данных технических решений при использовании в компоновке с ЭЦН являются:

- непродолжительный период воздействия на перекачиваемый флюид;
- одноразовое прохождение среды подвергаемой воздействию через магнитное поле;

Соответственно для решения задачи по повышению эффективности воздействия магнитным полем на перекачиваемый флюид необходимо устранить вышеперечисленные недостатки.

5.2.2 Разработка технологических решений для повышения эффективности воздействия магнитным полем в компоновке с УЭЦН

Как отмечалось ранее, рассмотренные технологические решения по использованию источника магнитного поля в компоновке с УЭЦН имеют ряд недостатков. Для понимания технологии применения магнитоактиваторов рассмотрим рис. 5.1.

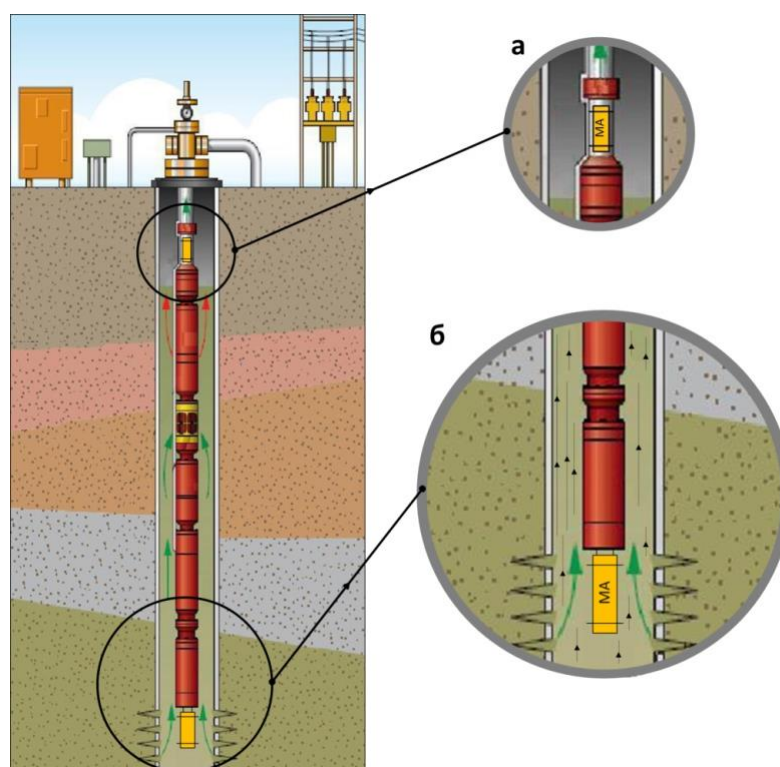


Рисунок 5.1 – Технические решения по применению источника магнитного поля в компоновке с УЭЦН

В нефтегазопромысловой практике магнитоактиваторы используют в конструкции УЭЦН при помощи крепления в области окончания компоновки УЭЦН. Данное техническое решение графически изображено на рис. 5.1 (вариант а). Так же существует вариант размещения в первой НКТ от установки (вариант б), но в данном случае перекачиваемый флюид подвергается обработке после ЭЦН, тем самым данное решение не направлено на защиту погружного оборудования центробежного насоса.

По результатам рассмотренных технологических решений, а так же с целью повышения эффективности воздействия магнитным полем на перекачиваемый флюид, нами разработано технологическое решение позволяющее осуществлять воздействие магнитным полем на флюид в полости УЭЦН.

Предлагаемое техническое решение заключается в размещении магнитных элементов в конструкции рабочих органов центробежного насоса, что в свою очередь позволяет повысить время воздействия магнитного поля на перекачиваемый флюид, а так же кратно увеличить число воздействий. Данное техническое решение графически изображено на рис. 5.2.

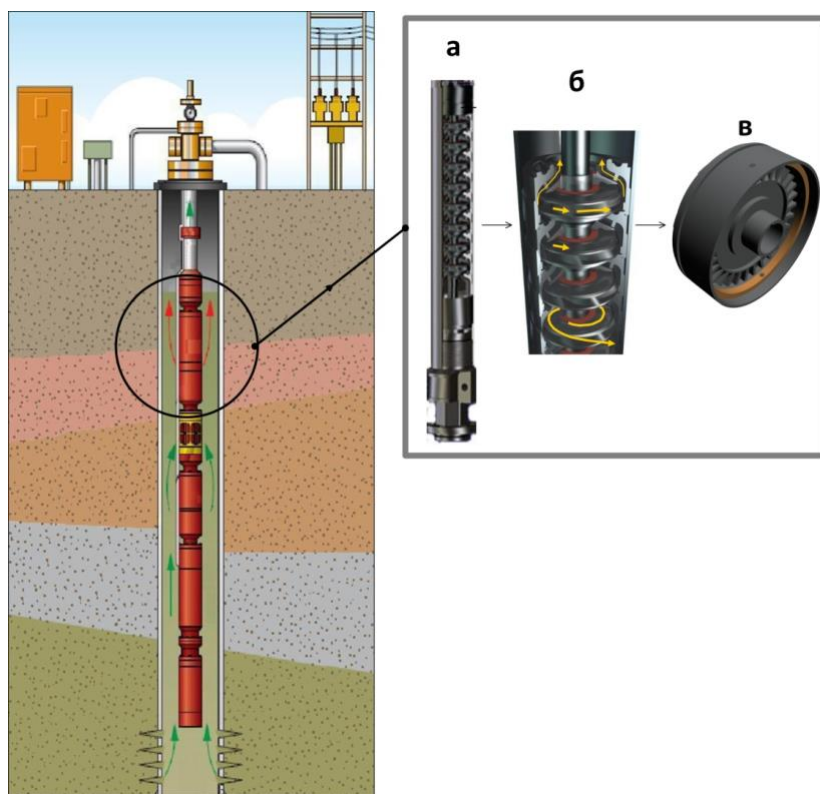


Рисунок 5.2 – Технические решения в конструкции электроцентробежного насоса для обработки добываемого флюида магнитным полем

С целью наглядного понимания на рис. 5.2 конструктивно разложено предлагаемое размещение источника магнитного поля в конструкции насоса.

На рис. 5.2 (а) размещена секция центробежного насоса, рис. 5.2 (б) - обозначает увеличенную часть секции, демонстрирующую рабочие органы насоса в компоновке, завершает данный графический цикл эскиз рабочего органа электроцентробежного насоса с магнитным элементом, рис. 5.2 (в).

Для расчётов и обоснования принятого решения в данной работе взята типовая компоновка УЭЦН (наибольшая частота отказов УЭЦН в данном габарите): УЭЦН5-50-2500 (где 5 – габарит насоса 117 мм, 50 – дебит установки м³/сут , 2500 – развиваемый напор установкой в метрах).
Дополнительные параметры:

- Данная установка имеет 518 ступеней (рабочих органов) в центробежном насосе.
- Диаметр эксплуатационной колонны скважины – 146 мм (толщина стенки 7,3 мм).
- Диаметр насосно-компрессорных труб для спуска УЭЦН – 73 мм (толщина стенки 5,5).
- Температура перекачиваемого флюида в зоне работы УЭЦН – 60-90 °С.

Таблица 5.2 – Расчёт скорости движения жидкости в области источников магнитного воздействия

Вариант тех. решения	Q _ж , м ³ /сут	Q _ж , м ³ /с	Диаметра сечения прохождения флюида, м	Площадь сечения прохождения флюида, м ²	Скорость, м/с	Длина участка магнитного воздействия, м	Время прохождения участка, с
Рис. 5.1 б	50	0,00057	0,014	0,000162	3,55	0,5	0,14
Рис. 5.2	50	0,00057	0,062	0,003	0,19	13	67,78

*в варианте (рис. 5.1, б) жидкость походит в кольцевом пространстве между м/у эксплуатационной колонной и УЭЦН, в варианте (рис. 5.2) жидкость проходит в полости центробежного насоса условно принятой внутреннему диаметру НКТ (62 мм).

Из данного расчёта получаем, что время нахождения перекачиваемого флюида в области воздействия магнитным полем в разы больше при размещении магнитных элементов в центробежном насосе, табл. 5.2.

Стоит отметить, что согласно полученным нами результатам экспериментальных исследований выявлено, что увеличение времени

воздействия магнитным полем на ОНФ-системы уменьшает средний размер частиц, снижает интенсивность отложения солей на поверхности оборудования и уменьшает вязкость системы. Тем самым повышает эффективность режима работы УЭЦН.

Соответственно, с целью более эффективного применения источника воздействия магнитным полем на перекачиваемый флюид в компоновке с УЭЦН разработано конструктивное решение, позволяющее разместить магнитные элементы (на основе МТМ «неодим-железо-бор») в конструкции направляющего аппарата.

Основные технические решения данной конструкции были предложены автором в работах [42, 120].

Детально графическое отображение данного решения представлено на рис. 5.3.

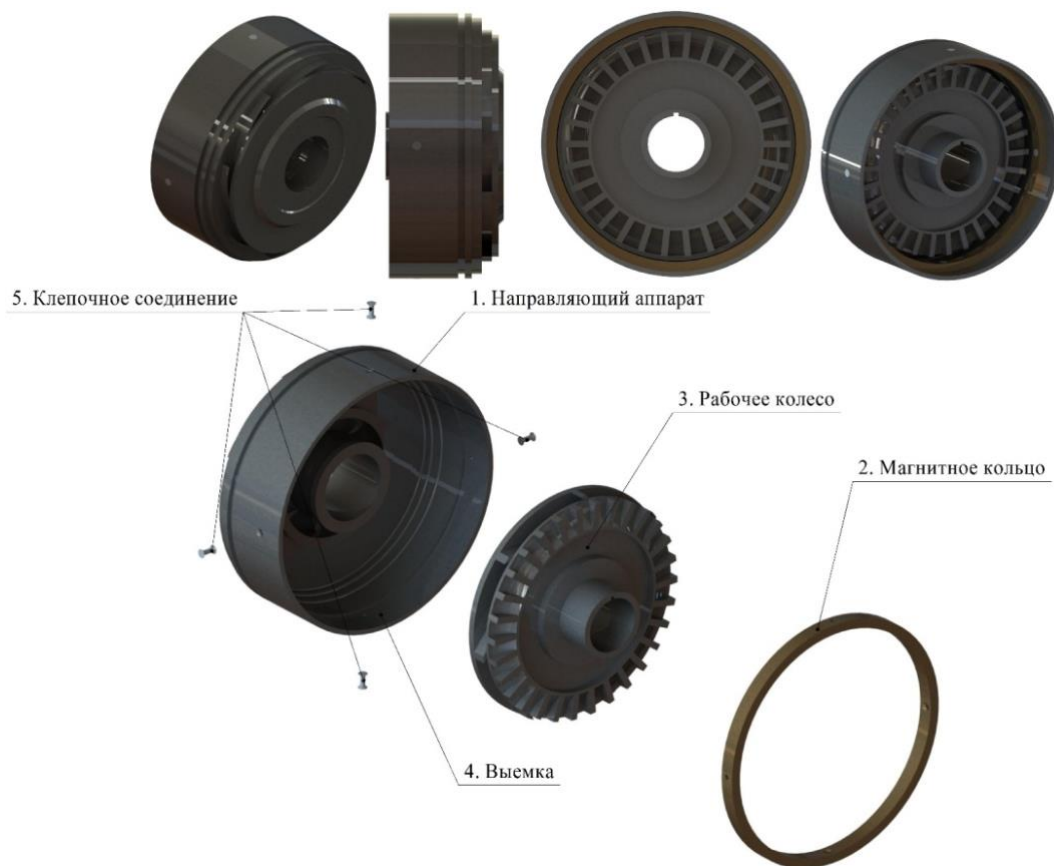


Рисунок 5.3 – Технические решения в конструкции электроцентробежного насоса для обработки добываемого флюида магнитным полем

Конструкторское решение предполагает установку магнитного элемента – 2, в выемку – 4, направляющего аппарата – 1, и крепится при помощи клепочного соединения – 5.

На данную разработку получен патент РФ (патент РФ № 157504) [121]. Детальные конструкторские чертежи представлены в Приложении А, Б.

5.3 Рекомендации по повышению эффективности эксплуатации УЭЦН

Наиболее уязвимой частью конструкции УЭЦН являются рабочие органы электроцентробежного насоса.

При эксплуатации УЭЦН на подземное оборудование воздействуют различные отрицательные факторы в виде АСПО (асфальтосмолопарафиновые отложения), солеотложений, механических примесей. Стоит принять во внимание, что при проявлении комплекса отрицательных факторов (3-4 одновременно) необходимо применение ряда методов для защиты подземного оборудования, что увеличивает себестоимость добываемой продукции и как следствие делает разработку объектов менее эффективной.

Единственным способом для достижения наиболее эффективной эксплуатации скважин в данных условиях является комплексный метод защиты от ряда осложнений - метод магнитного воздействия на добываемый флюид. Данный метод позволяет осуществить более эффективное достижение необходимых показателей средней наработки на отказ подземного оборудования ЭЦН являющихся экономически целесообразными.

В рамках завершения реализации задач данной работы, ведущих к повышению эффективности работы электроцентробежных насосов при эксплуатации в осложнённых условиях, на текущем этапе описаны

рекомендации по использованию методов магнитной обработки на месторождениях.

В разделе 5.2 были представлены технические решения, позволяющие повысить эффективность воздействия магнитного поля на перекачиваемый флюид. Данные технические решения подразумевают управление такими осложнениями, как пескопроявление и солеотложения. Такому осложнению как АСПО не было уделено особого внимания, так как высокая температура в зоне работы центробежного насоса исключает возможность отложений на рабочих органах ЭЦН. Тем не менее, на экспериментальном уровне в работе показано, что магнитное поле оказывает влияние на реологические свойства нефти.

Подводя итог можно сделать заключение, что магнитное воздействие рассматривается как эффективное средство управления такими осложнениями в нефтегазодобычи как солеотложения и пескопроявления (генерация дисперсной минеральной фазы).

В данных осложнениях присутствует разная природа взаимодействия с рабочими органами УЭЦН, которая обусловлена следующими факторами:

- в случае солеотложения из раствора пластовой жидкости формируются гидратированные комплексы малых размеров и высокой химической активности;
- в случае пескопроявления формируется дисперсная минеральная фаза, которая в большинстве случаев (за исключением коллоидной глинистой фракции) представлена малоактивными частицами.

Соответственно, для солеотложения значимы физико-химические взаимодействия, в то время как для дисперсной минеральной фазы – энергетические механизмы.

По результатам экспериментальных исследований и построения принципов физико-химических процессов при воздействии магнитного поля на ОНФ-системы получены и рассмотрены результаты:

- в случае с солеотложениями при воздействии магнитным полем интенсифицируется процесс образования соли;
- в случае с пескопроявлением при воздействии магнитным полем наблюдается диспергирование минеральной фазы (агломератов) на более мелкие частицы.

Для наглядного представления логической цепочки по минимизации осложнений при эксплуатации УЭЦН с помощью магнитного поля, табл. 5.3.

Таблица 5.3 – Снижение влияния осложнений при эксплуатации УЭЦН с помощью воздействия магнитного поля на ОНФ-системы

Отрицательный фактор	Осложнения	Природа взаимодействия с поверхностью рабочих органов УЭЦН	Результат воздействия на отрицательные факторы	Достижимые эффекты снижающие осложнения
Пескопроявления	Абразивный износ, засорение	Энергетическая	Диспергирование минеральной фазы (агломератов)	Частицы минеральной фазы с меньшим размером оказывают менее интенсивное влияние на поверхность
Солеотложения	Отложение солей на поверхности, засорение	Физико-химическая	Интенсификация выпадения солей в потоке системы	Образование солей в потоке жидкостки, а не на поверхности оборудования

В случае воздействия магнитным полем на дисперсную минеральную фазу происходит диспергирование агломерированных комплексов [122]. Очевидно, что при одной и той же скорости кинетическая энергия тонких частиц будет меньше, чем крупных агрегированных части. В данном случае происходит снижение абразивного износа и засорения подземного оборудования центробежного насоса.

В случае с солеотложениями, воздействие магнитного поля на систему интенсифицирует процесс образования соли в потоке системы, тем самым препятствуя ее образованию на поверхности рабочих органов электроцентробежного насоса. Стоит отметить, что образовавшийся осадок в потоке жидкости имеет химическую активность, которая способствует его осаждению-прилипанию на поверхность рабочих органов. Вне зависимости от построенных физико-механических принципов [123], будь то рост числа

зародышей или рост конденсированной фазы в обоих случаях которые приводят к разным размерам кристаллов в осадке, данный осадок может осаждаться на поверхности рабочего органа центробежного насоса. Данный случай был бы возможен в неподвижной системе, а так как система в нашем случае имеет высокую скорость потока в полости центробежного насоса, то образовавшийся кристаллический осадок будет выноситься потоком перекачиваемой жидкости.

В рамках фундаментальной работы [124] по рассмотрению области технологий относящихся к нанотехнологиям, справедливо утверждение, что рассматриваемое воздействие предлагаемого технического решения имеет нанотехнологический подход, а именно целенаправленное регулирование свойств объектов на молекулярном и надмолекулярном уровне.

5.4 Определение экономически целесообразных показателей эффективности эксплуатации УЭЦН

В нефтегазопромысловой практике чаще при определении эффективности эксплуатации УЭЦН используется показатель МРП – межремонтный период оборудования. Так же используется показатель СНО – средняя наработка на отказ оборудования. Разница между данными показателями заключается в том, что МРП определяется по действующему фонду скважин при учёте времени с момента вывода скважины на режим до момента его отказа, а СНО считается только по отказавшим скважинам при учёте времени с момента кнопочного запуска до отказа. То есть, МРП показывает отрезок времени между проводимыми ремонтами, а СНО – полную продолжительность наработки объекта с момента его первого ввода в работоспособное состояние до отказа или с момента его восстановления до следующего отказа.

Повышение таких показателей эффективности эксплуатации УЭЦН как МРП и СНО является задачей любой нефтегазодобывающей компании. На

различных конференциях и форумах представители отрасли по направлению механизированной добычи нефти постоянно рапортуяют о повышении данных показателей, ставя в дальнейшем себе новые высоты.

Рассматривая любую инженерную систему в периметре нефтегазодобывающего предприятия, стоит понимать, что показатели работы данной системы влияют на общий результат не только в виде физических данных и объёмов, но и затрагивают экономическую составляющую. Соответственно, при рассмотрении повышения показателей эксплуатации оборудования, необходимо рассматривать результаты данной задачи через призму экономической эффективности, тем самым определяя наиболее оптимальные параметры для достижения.

Для сопоставления физических показателей и экономической эффективности поставлена задача – выполнить расчёт оптимального МРП на предстоящий год (для примера в расчёте взят 2015 год), а именно посчитать тот уровень МРП который позволит обеспечить наибольшую экономическую эффективность.

Принцип формирования экономической эффективности принят как разница между затратной частью (дополнительные затраты на увеличение МРП) и доходной частью (экономия к базовому варианту). Графическое представление методики приведено на рисунке 5.4.

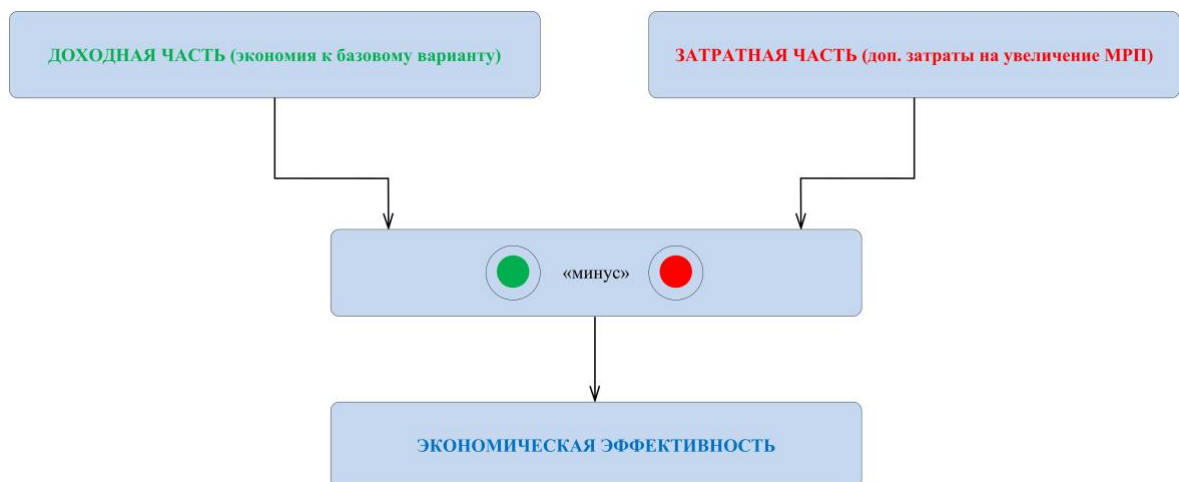


Рисунок 5.4 – Принцип расчёта экономической эффективности от достигаемого уровня МРП

Доходная часть в методике расчёта состоит из экономии на ремонте скважин и подземном оборудовании и доходе от дополнительной добыче нефти. Затратная часть формируется исходя из затрат на перечень мероприятий для увеличения межремонтного периода оборудования. Для типового нефтегазодобывающего комплекса Западной Сибири структура мероприятий представлена на рис. 5.5.

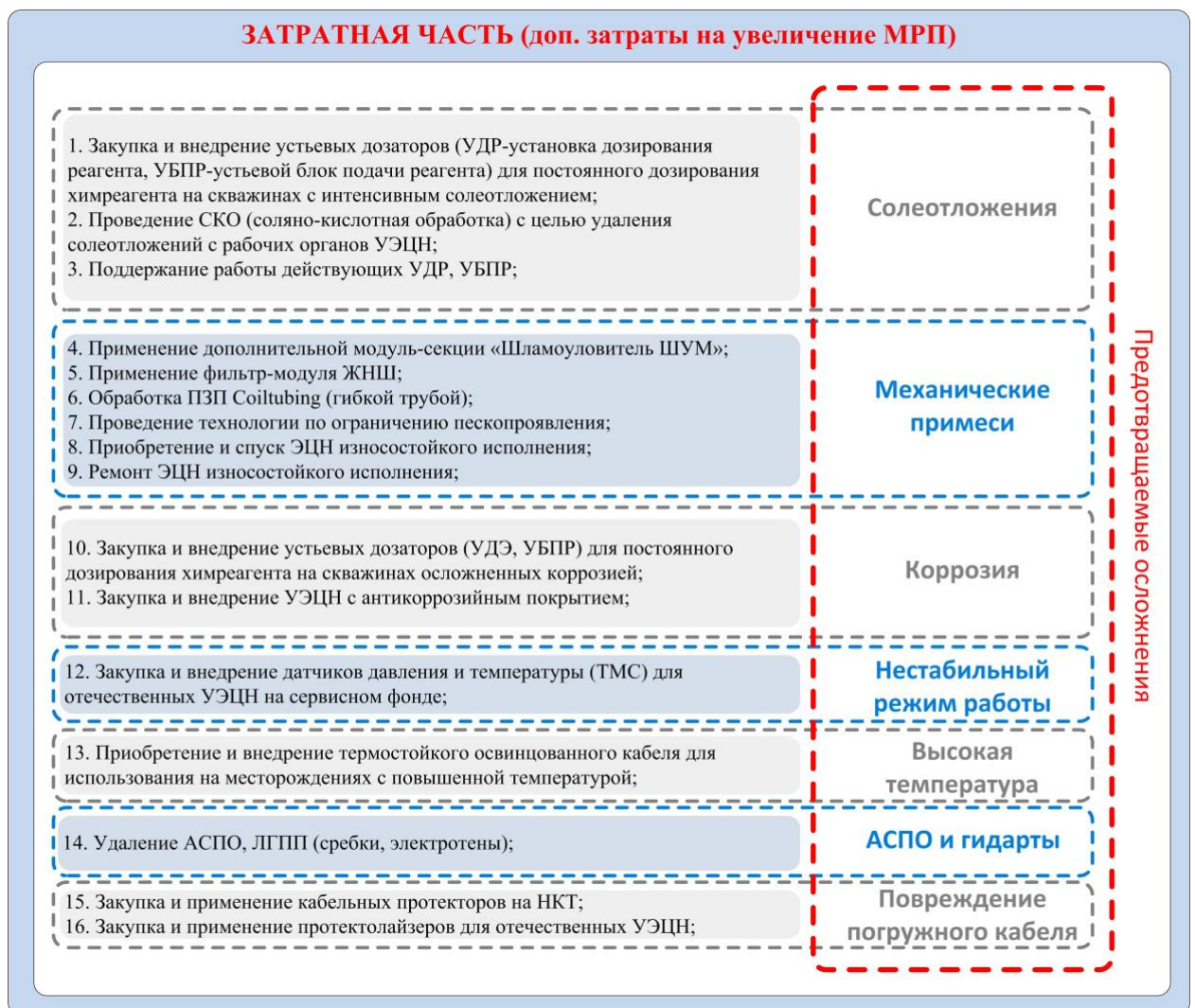


Рисунок 5.5 – Структура мероприятий направленных на повышение МРП УЭЦН

Данные мероприятия направлены на повышение эффективности эксплуатации УЭЦН путём предупреждения таких осложнений как:

солеотложения; механические примеси; коррозия; нестабильный режим работы пласта; высокая температура в зоне работы подвески; АСПО и гидраты; повреждение погружного кабеля при спуске оборудования в скважину.

С целью определения оптимального набора мероприятий для достижения наиболее высокой доходной части выполнен расчёт по восьми вариантам с разным набором мероприятий. В рамках данного расчёта было произведено нарастающее увеличение используемых мероприятий по вариантам с определением их действия на показатель МРП.

На рис. 5.6 представлена зависимость общих затрат (затратной части) и суммарного дохода (доходной части) с отражением достигаемого МРП. Представленный график отражает оптимальный расчёт (вариант №4, по порядку слева направо), как наиболее эффективный с экономической точки зрения.

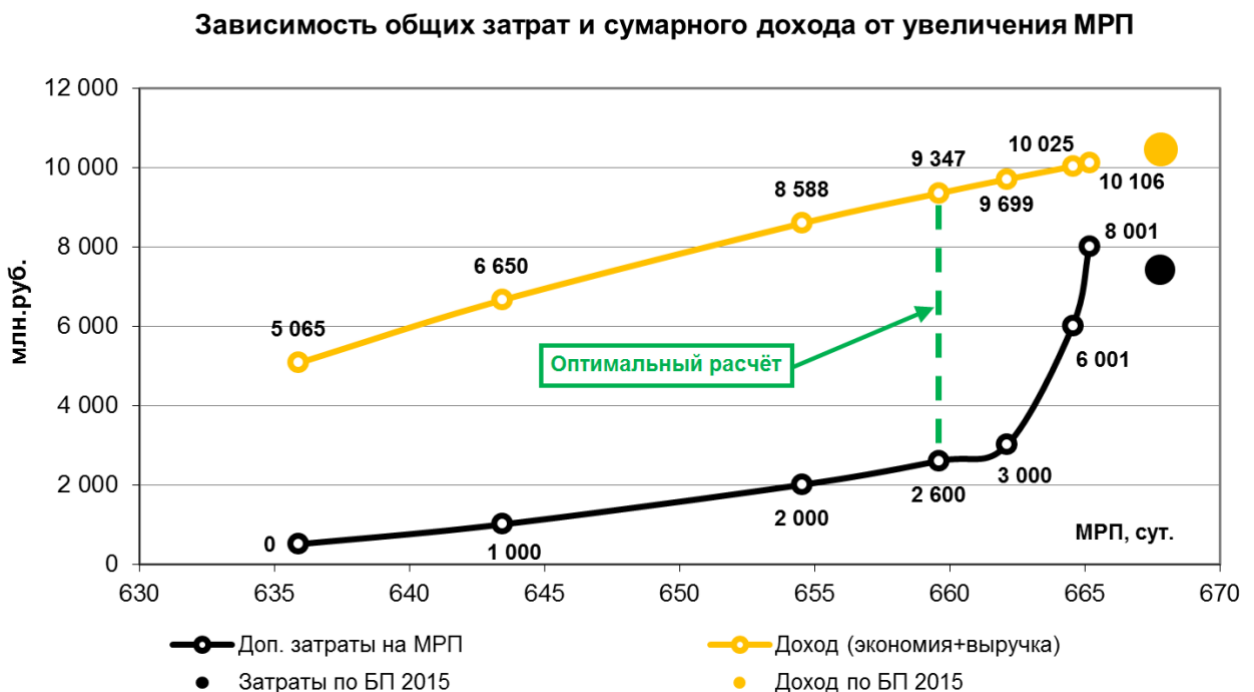


Рисунок 5.6 – Зависимость общих затрат и суммарного дохода от увеличения МРП

Стоит отметить, что основная идея расчёта определить оптимальные значения необходимой эффективности эксплуатации УЭЦН. Так как зачастую производственные службы в рамках планирования на предстоящее время просто закладывают набор мероприятий, определяя уровень с учётом запаса на будущее и уровня ранее используемых средств. Тем самым никто не задаётся вопросом на сколько выгоден тот или иной уровень МРП, и стоит ли он тех затрат которые для этого закладываются.

Выполненный расчёт в сопоставлении с показателями, сформированными в рамках бизнес-планирования демонстрируют, что при определении наиболее оптимальной затратной части достигается наибольшая экономическая эффективность чем ранее запланированная. На рисунке 6 видно, что отличие расчётных показателей от ранее запланированных является существенным.

Для более детального понимания выполненных расчётов рассмотрим рис. 5.7. По расчетам была определена область оптимального МРП, значение которого составляет от 655 до 662 суток. Оптимальным значением является МРП равный 660 суткам, обеспечивающий итоговую эффективность в размере 6 747 млн. руб. в год. В то время как в бизнес-плане было заложено МРП равный 668 суткам, при итоговой эффективности 3 068 млн. рублей.

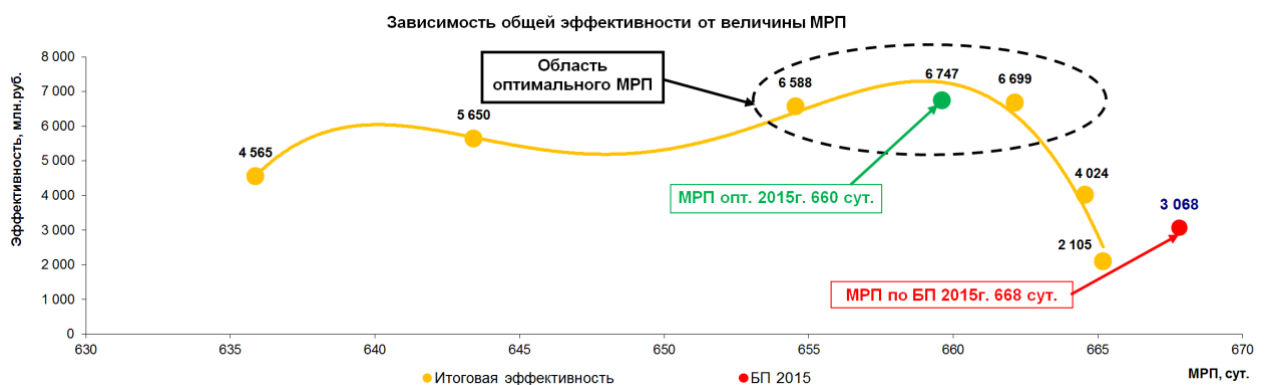


Рисунок 5.7 – Зависимость общей эффективности от величины МРП

Соответственно при выполнении поиска оптимальных значений сопровождающихся сбалансировано подобранным перечнем мероприятий итоговая эффективность увеличивается в 2 раза, в то время как снижение МРП составило 8 суток по сравнению с заложенными значениями в бизнес-план.

По итогам подбора оптимальных уровней эффективности эксплуатации УЭЦН, стоит отметить, что перечень мероприятий направленных на предотвращение осложнений (рис. 5.5) имеет три раздела осложнения которые рассмотрены в текущей работе – механические примеси, солеотложения и АСПО. Предлагаемый метод магнитного воздействия на ОНФ-систему, целью которого является предотвращение осложнений, является комплексным методом, влияние которого возможно одновременно на ряд таких осложнений как механические примеси, солеотложения и АСПО. Эффекты влияния на данные осложнения подтверждены при лабораторных исследованиях. В разрезе затрат на мероприятия и оборудование затраты на данные осложнения составляют порядка 45%, соответственно при применении технологии магнитного воздействия возможно оказание влияния на данную область затрат.

Разработанная технология магнитного воздействия не требует значительных затрат для создания и внедрения на производстве, соответственно не является дорогостоящей. Для принятия решения о внедрении на производстве необходима опытно-промышленная эксплуатация, которая расширит представление о достигаемых эффектах в условиях месторождения.

По результатам проведённых расчётов и предлагаемых путей повышения эффективности эксплуатации УЭЦН получена оптимальная зона эффективности эксплуатации парка УЭЦН, данная зона имеет разделы перечня мероприятий возможных для замены технологией воздействия магнитным полем или их совместным использованием. Соответственно полученная область, возможна для дальнейшей оптимизации при внедрении

магнитной технологии на производстве по результатам промышленной апробации на месторождении.

5.5 Дорожная карта промышленной апробации технологии магнитного воздействия

С целью апробации разработанных конструкторских решений, а так же завершения цикла построения системной технологии управления ОНФ-системами, необходимо реализовать пилотный проект в соответствии с прилагаемой КСМ (календарно-сетевой моделью) на рис. 5.8.

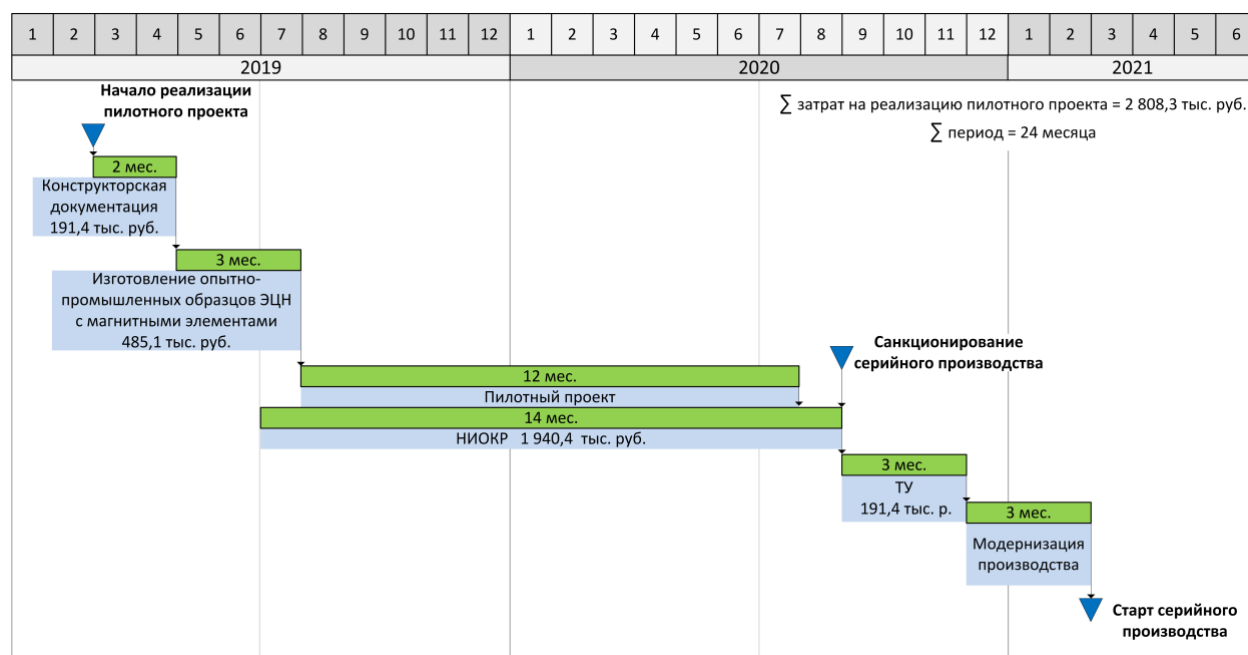


Рисунок 5.8. Календарно-сетевая модель реализации пилотного проекта по внедрению на месторождениях ЭЦН с магнитными элементами

Пилотный проект по внедрению данных технических решений в производстве будет включать в себя:

- документальное оформление всех технических решений в соответствии с требованиями к документации данного рода;
- изготовление опытно-промышленных образцов на базе УЭЦН;

- выполнение исследований при использовании опытно-промышленных образцов в реальных условиях эксплуатации;
- наблюдение, интерпретация и оформление результатов данных исследований на базе научно-исследовательского института;
- разработка технических условий для запуска серийного производства ЭЦН с магнитными элементами;
- модернизация промышленных линий для производства рабочих органов ЭЦН с магнитными элементами на заводах-изготовителях.

Стоит отметить, что реализация пилотного проекта займёт 24 месяца и потребует затрат в размере 2 803,3 тысячи рублей. Необходимо обратить внимание, что наибольший объём технических решений проработан и оформлен в необходимом документальном виде, соответственно потребует лишь оформительскую доработку в рамках пилотного проекта.

Важным моментом пилотного проекта является реализация перспективного направления дальнейших исследований данной научной работы, а именно выполнение лабораторных экспериментов в реальных условиях пластовой температуры и давления, а так же объектов исследования (керна, пластовая вода, нефть) с изготовлением экспериментального стенда на основе УЭЦН. Данные исследования предполагается выполнить как в условиях завода-изготовителя, так и на реальных месторождениях.

Для реализации этапа апробации технологии рассматриваются следующие производители:

- ЗАО «Новомет-Пермь»;
- ООО «Борец»;
- ООО «Алмаз»;
- ОАО «Алнас»;
- ООО «Технологическая Компания Шлюмберже».

По результатам пилотного проекта будет осуществлена реализация данной технологии в промышленном масштабе на месторождениях с ОНФ-системами.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 5

1. Показано, что магниты на основе редкоземельных металлов Nd-Fe-B обладают наиболее оптимальными свойствами, делая их перспективным материалом для использования в компоновке с УЭЦН;
2. Выполнен сравнительный анализ современного нефтегазопромыслового оборудования, в виде представленных технологических решений воздействия магнитным полем на перекачиваемый флюид в компоновке с УЭЦН с отражением основных недостатков данных технологий;
3. Разработано техническое решение, устраняющее основные недостатки технологии омагничивания перекачиваемого флюида в компоновке с УЭЦН, а именно:
 - непродолжительный период воздействия на перекачиваемый флюид;
 - одноразовое прохождение среды подвергаемой воздействию через магнитное поле.

Данное техническое решение повышает эффективность воздействия магнитного поля на перекачиваемый флюид, снижая размеры частиц в флюиде, интенсивность отложения солей на поверхности оборудования и вязкость флюида.

На данное техническое решение получен патент РФ, а так же разработаны конструкторские чертежи и технологическая документация.

4. На основании результатов наших экспериментальных исследований и принципов структурообразования при воздействии магнитным полем на ОНФ-системы предложены следующие механизмы воздействия магнитного поля на осложнения:

- при пескопроявлении происходит диспергирование дисперсной минеральной фазы на более мелкие комплексы;
- при солеотложении происходит интенсификация образования солеотложений в потоке системы, а не на поверхности оборудования.

5. Разработаны рекомендации по практическому использованию полученных научных результатов при разработке и эксплуатации нефтяных месторождений.

Метод магнитного воздействия на перекачиваемый флюид в компоновке электроцентробежного насоса рекомендуется использовать на месторождениях с такими осложнениями как пескопроявления, солеотложения, а так же возможно использования для борьбы с АСПО. Применение возможно как для воздействия на осложнения проявляющиеся в единичном случае, так и в комплексе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нефтяная промышленность страны в ближайшей перспективе выходит на новые горизонты характеризующиеся ухудшением качества ресурсной базы. Так, в соответствии с Генеральной схемой развития нефтяной отрасли России до 2035 года, отмечается, что для восполнения падающих объёмов добычи нефти их придётся заместить за счёт новых месторождений с трудноизвлекаемыми запасами (ТРИЗ). Разработка трудноизвлекаемых запасов характеризуется выраженностью геологической группой осложнений формирующей отрицательные факторы влияющие на эффективность эксплуатации подземного оборудования.

Важнейшей задачей при разработке нефтяных месторождений является совмещение двух ключей, а именно: высокий уровень извлечения углеводородного сырья; высокие технико-экономические показатели разработки.

Принцип совместного использования данных ключей обеспечивает применение технологических подходов разработки месторождений, направленных на эффективное развитие нефтегазодобывающего актива. Таким образом, обеспечивается принцип комплексного развития и принятия наиболее эффективных решений.

Стоит отметить, что достижение высоких технико-экономических показателей разработки осуществляется при целесообразных эксплуатационных затратах на подъём добываемого флюида. Соответственно, удельные затраты на добычу нефти во-первых являются наиболее значимой величиной при достижении данных целей, а так же напрямую зависят от эффективности эксплуатации установок электроцентробежных насосов.

И только применение новых технологий с использованием новых подходов может обеспечить повышение эффективности эксплуатации

установок электроцентробежных насосов, повышая технико-экономические показатели разработки месторождений.

По результатам диссертационного исследования сформированы основные выводы:

1. Проведён анализ методов управления эффективностью работы электроцентробежных насосов при эксплуатации в осложнённых условиях. Наиболее перспективными методами управления эффективностью работы электроцентробежных насосов при эксплуатации в осложнённых условиях представляются методы магнитного воздействия на флюиды.
2. Для проведения экспериментальных исследований по воздействию магнитного поля на ОНФ-системы была разработана лабораторная исследовательская установка с применением современных средств измерения, определения и регистрации наблюдаемых параметров.
3. Установлена прямая зависимость интенсивности осаждения карбоната кальция от параметра пересыщения при воздействии магнитным полем. Воздействие магнитного поля в течении 15 секунд на водный раствор карбоната кальция увеличивает количество выпадающего осадка CaCO_3 на $24 \div 41\%$, эффект увеличивается от 24% до 41% по мере изменения параметра пересыщения от 0 до 1,2. Увеличение напряженности магнитного поля до 60 кА/м приводит к резкому повышению доли выпавшего осадка на $11 \div 22\%$, дальнейшее повышение напряженности слабо влияет на выпадение осадка.
4. Наблюдается, что с помощью магнитной обработки может быть достигнут устойчивый эффект диспергирования элементов горной породы в составе композиций с дисперсной минеральной фазой. Так при воздействии магнитным полем напряженностью 120 кА/м на композицию водной суспензии с частицами-обломками песчаника среднечисленный диаметр частиц уменьшается в 1,5 раза, при

воздействии на композицию нефти с частицами-обломками песчаника среднечисленный диаметр частиц уменьшается в 1,36 раза.

Впервые экспериментально получен эффект диспергирования дисперсной минеральной фазы при воздействии магнитным полем, что позволяет рассматривать возможность применения магнитной технологии для управления таким осложнением как пескопроявление с целью минимизации воздействия на рабочие органы электроцентробежного насоса.

5. Выполнены исследования принципов формирования структурообразования в ОНФ-системе, позволяющие рекомендовать магнитную технологию для использования с целью управления такими осложнениями как пескопроявления и солеотложения.
6. На основании результатов наших экспериментальных исследований и принципов структурообразования при воздействии магнитным полем на ОНФ-системы предложены следующие механизмы воздействия магнитного поля на осложнения:
 - при пескопроявлении происходит диспергирование дисперсной минеральной фазы на более мелкие комплексы;
 - при солеотложении происходит интенсификация образования солеотложений в потоке системы, а не на поверхности оборудования.
7. На основании проведенных лабораторных исследований и использования физико-механических принципов формирования структурообразования при воздействии магнитного поля на ОНФ-системы разработано техническое решение конструкционной компоновки УЭЦН (патент РФ №157504), включающей в себя электроцентробежный насос состоящий из рабочих органов с постоянными магнитами из редкоземельного сплава особой конструкции, обеспечивающей увеличение времени воздействия

магнитного поля на добываемый флюид и требуемую напряженность магнитного поля.

8. Впервые предложен способ магнитного воздействия на перекачиваемый флюид в компоновке электроцентробежного насоса, рекомендуемый для использования на месторождениях с такими осложнениями как пескопроявления и солеотложения. Предлагаемые рекомендации позволяют повысить эффективность эксплуатации скважин электроцентробежными насосами. Применение возможно как для воздействия на осложнения проявляющиеся в единичном случае, так и в комплексе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дж. Ф. Ли, Дэвид Л. Дивайн, Линн Роулан. Обзор вопросов эксплуатации установок ЭЦН // ROGTEC. - 2009.
2. Персиянцев М.Н. Добыча нефти в осложнённых условиях. - М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. - 653 с.
3. Савенок О. В. Оптимизация функционирования эксплуатационной техники для повышения эффективности нефтепромысловых систем с осложнёнными условиями добычи: монография. - Краснодар: Издательский Дом Юг, 2013. - 336 с.
4. Якуцени В.П., Петрова Ю.Э., Суханов А.А. Динамика доли относительного содержания трудноизвлекаемых запасов нефти в общем балансе // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2007.
5. Брехунцов А.М., Монастырев Б.В., Нестеров И.И. Закономерности размещения залежей нефти и газа Западной Сибири // Геология и геофизика. - 2011. - Т. 52. - № 8. - С. 1001-1012.
6. Березовский Д.А., Савенок О.В., Анализ осложнений при эксплуатации газовых месторождений на завершающей стадии и разработка метода прогнозирования состояния пород-коллекторов на основе методов междисциплинарного моделирования // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). - 2014. № 1. - С. 26-34.
7. Чернова К.В., Аптыкаев Г.А., Шайдаков В.В. Эксплуатация глубинных электроцентробежных насосных установок в условиях интенсивного солеотложения // Современные наукоемкие технологии. - 2007. - №10.
8. О некоторых перспективных путях развития УЭЦН [Электронный ресурс] // Российский Государственный Университет нефти и газа имени И.М. Губкина. - 2007. - Режим доступа: <http://old-version.autotechnologist.com/d/konf1.pdf>.
9. Субарев Д.Н. Оптимизация подбора оборудования скважин с учетом прогноза надежности: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Субарев Дмитрий Николаевич. - Тюмень, 2013.

10. Мусин Р.Р. Повышение эффективности эксплуатации скважин в осложнённых геолого-промысловых условиях (на примере ОАО «Варьеганнефтегаз»): дис. ... канд. техн. наук.: 25.00.17 / Мусин Рустам Расимович. - Уфа, 2014.
11. Лапшин А.А. Осложнения в механизированной добыче и методы борьбы с ними, применяемые в ООО «РН-Юганскнефтегаз» // Инженерная практика. - 2014. - № 02. - С. 4-9.
12. Хужин М.Р. Повышение эффективности эксплуатации скважин осложнённого фонда (на примере месторождений Западной Сибири): дис. ... канд. техн. наук.: 25.00.17 / Хужин Марат Рафакович. - Уфа, 2015.
13. Топольников А.С., Литвиненко К.В., Рамазанов Р.Р. Комплексный подход к проектированию системы механизированной добычи нефти в условиях выноса мехпримесей // Инженерная практика. - 2010. - № 2.
14. Гарифуллин А.Р. Опыт борьбы с мехпримесями в ООО «РН-Юганскнефтегаз» // Инженерная практика. - 2010. - № 2.
15. Гумеров К.О. Повышение эффективности эксплуатации скважин электроцентробежными насосами в условиях вязких водонефтяных эмульсий: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.17 / Гумеров Кирилл Олегович. - СПб., 2015.
16. Агеев Ш., Куприн П., Мельников М. и др. Высоконадежные центробежные установки для добычи нефти в осложненных условиях // Бурение и нефть. - 2006. - № 04.
17. Афанасьева О. В., Голик Е.С., Первухин Д.А. Теория и практика моделирования сложных систем: Учеб. пособие. - СПб.: СЗТУ, 2005. - 131 с.
18. Острейковский, В. А. Теория надежности: учебник для вузов по направлениям «Техника и технологии» и «Технические науки». - М. : Высшая школа, 2008. - 463 с.
19. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов. - М. : Высшая школа, 2003. - 479 с.

20. Перельман О.М., Пещеренко С.Н., Рабинович А.И., Слепченко С.Д. Статистический анализ надежности погружных установок в реальных условиях эксплуатации // Надежность и сертификация оборудования для нефти и газа. - 2003. - № 3. - С. 28–34.
21. Ишмурзин А.А. Зависимость аварийных отказов установок погружных центробежных насосов от времени работы в скважине // Нефтегазовое дело. - 2006.
22. Ишмурзин А.А., Пономарев Р.Н. Анализ причин отказов установок погружных центробежных насосов в ООО «Лукойл - Западная Сибирь» // Нефтяное хозяйство. - 2001. - № 4. - С. 58 – 62.
23. Слепченко С. Статистическая теория надежности и перспективы ее использования для анализа отказов УЭЦН // Нефтегазовая вертикаль. - 2006. - №12. - С. 48–51.
24. Фролов С.В., Маркелов Д.В. Вопросы анализа надежности УЭЦН при интенсификации добычи нефти // Надежность и сертификация оборудования для нефти и газа. - 2002. - №2. - С. 39-43.
25. Смирнов Н.И. Исследование влияния износа на ресурс УЭЦН // Сборник трудов международной научно — технической конференции «Актуальные проблемы трибологии». - 2007. - Т. 1. - С. 410-416.
26. Шубин С.С. Методическое и экспериментальное обеспечение определения технического состояния установок электроцентробежных насосов в процессе эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Шубин Станислав Сергеевич. - Уфа, 2014.
27. Гущин Н.С., Ковалевич Е.В., Петров Л.А., Пестов Е.С. Новый метод изготовления рабочих органов погружных центробежных насосов из аустенитного чугуна с шаровидным графитом // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2008. - № 4. - С. 44-48.
28. Глускин Я.А., Пальчиков А.И. Ступень погружного многоступенчатого центробежного насоса [Электронный ресурс] / Патент RU (11) 2220327 (13)

- С2 // Поиск патентов и изобретений, зарегистрированных в РФ и СССР.
- Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/244/2446316.html>.
29. Круглов С.В. Работа деталей УЭЦН с полимерным защитным покрытием // Инженерная практика. - 2010. - № 06. - С. 105-109.
30. Прожега М. В. Разработка методов повышения износостойкости радиальных пар трения скольжения электрических центробежных насосов: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Прожега Максим Васильевич. - М., 2009.
31. Чад Бремнер и др. Развивающиеся технологии: погружные электрические погружные насосы // Нефтегазовое обозрение. - 2006/2007.
32. Ведерников В. А. Модели и методы управления режимами работы и электропотреблением погружных центробежных установок: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06 / Ведерников Владимир Александрович. - Тюмень, 2006.
33. Ведерников В. А., Гапанович В.С., Козлов В.В. Особенности применения погружных электроцентробежных насосов на нефтяных месторождениях Среднего Приобья // Вестник кибернетики. - 2008. - С. 27-32.
34. Лекомцев А.В. Методика подбора электроцентробежных насосов в скважины с высоким газовым фактором на месторождениях Верхнего Прикамья [Электронный ресурс] // Пермский национальный исследовательский политехнический университет. - 2012. - март. - Режим доступа: <http://www.sworld.com.ua/konfer26/787.pdf>.
35. Мартюшев Д. Защита от механических примесей // Арсенал нефтедобычи. - 2008. - №1 (04).
36. Антипин Ю.В., Гильмутдинов Б.Р., Мустафин Р.С., Аюпов А.Р. Использование ингибирующих композиций в составе азотсодержащей пены для борьбы с коррозией и солеотложением в скважинах // Нефтегазовое дело. - 2009. - Вып. 1. - С. 149-154.
37. Шабля В.В. Опыт работы ТПП «Когалымнефтегаз» с солеобразующим фондом скважин // Инженерная практика: пилотный выпуск. - 2009. - С. 22-25.

38. Жуйко П.В. Разработка принципов управления реологическими свойствами аномальных нефтей: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.17 / Жуйко Петр Васильевич. - Ухта, 2003.
39. Спиридонов Р.В., Демахин С.А., Кивокурцев А.Ю. Магнитная обработка жидкостей в нефтедобыче. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2003. - 136 с.
40. Лоскутова Ю.В., Юдина Н.В. Влияние магнитного поля на структурно-реологические свойства нефтей // Известия Томского политехнического университета. - 2006. - Т. 309. - № 4.
41. Исследовательские работы по определению принципиальной возможности применения магнитного поля для деэмульсации нефти / ООО «РН-УфаниПИнефть». - Уфа, 2012.
42. Ушаков А. В. Применение источника воздействия магнитных полей в нефтегазодобыче // Проблемы геологии и освоения недр: труды XVI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых. Томск. - 2012. - С. 146-148.
43. Ушаков А.В. Перспективы применения магнитной обработки пластового флюида с целью управления эффективностью работы погружных электроцентробежных насосов при эксплуатации в осложненных условиях // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2015. - № 8. - С. 44-50.
44. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред. 2-е изд., испр. - М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. - Т. VIII. - 621 с.
45. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика часть 1. - М. : Физматгиз, 1963. - 584 с.
46. Классен В.И. Омагничивание водных систем. - М. : Химия, 1982.
47. Щурин К.В., Цветкова Е.В. Изменение физико-химических свойств жидких сред методом магнитной обработки // Вестник ОГУ. - 2011. - № 10 (129).

48. Смирнов А.Н., Лапшин В.Б., Балышев А.Б. и др. // Химия и технология воды. - 2005. - № 2. - С. 111-137.
49. Лесин В.И. Влияние магнитного поля на свойства веществ. Что происходит с жидкими растворами после их обработки магнитным полем? [Электронный ресурс] // Научно-исследовательский институт нефтехимического синтеза РАН. - Режим доступа: <http://magneticliquid.narod.ru/authority/092.htm>.
50. Мартынова О. И., Гусев Б. Т., Леонтьев Е. А. К вопросу о механизме влияния магнитного поля на водные растворы солей. Успехи физических наук. - М. : Наука, 1969. - 98 т. - 1 вып. - 195-199 с.
51. Самойлов О.Я. Структура водных растворов электролитов и гидратация ионов. -М. : Изд-во АН СССР, 1957. - 182 с.
52. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. - М. : Химия, 1980. - 320 с.
53. Скрышевский А.Ф. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел. - М. : Высшая школа, 1980. - 328 с.
54. Лоскутова Ю.В. Влияние магнитного поля на реологические свойства нефтей: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.13 / Лоскутова Юлия Владимировна. - Томск, 2003.
55. Любецкий Л.Л. Применение устройства «МАУТ» в нефтедобыче // ООО ПКФ «Экси-Кей» Институт химии нефти СО РАН. - Томск. - 2012.
56. Колесников А.С., Нурдаулет А.Н., Досжанов К.А. Обзор исследований влияния магнитного поля на асфальто- смоло- парафиновые отложения // European student scientific journal. - 2013. - №1.
57. Козачок М.В. Обоснование технологии перекачки высокопарафинистой нефти из Харьягинского месторождения с использованием комплексного воздействия магнитного поля и ультразвуковых колебаний: дис. ... канд. тех. наук: 25.00.19 / Козачек Максим Васильевич. - СПб., 2012.

58. Жилин Г.И., Шишкин Н.Д. Исследование термомангнитной дезмульсии нефти в лабораторной экспериментальной установке // Вестник Астраханского государственного технического университета. - 2013. - № 2. - С. 21-25.
59. Инюшин Н.В., Ишемгузин Е.И. и др. Аппараты для магнитной обработки. Уфа: Государственное – издательство научно-технической литературы «Реактив», 2000. - табл., - ил.
60. Чернова К.В. Совершенствование методов подготовки углеводородного сырья для процессов нефтехимии и нефтепереработки: дис. ... кан. тех. наук: 02.00.13 / Чернова Катерина Владимировна. - Уфа, 2006.
61. Хасанов М.М., Рагулин В.В., Михайлов А.Г., Шайдаков В.В., Никитин Р.В., Лаптев А.Б., Князев В.Н. Воздействие магнитного поля на отложения карбонатных осадков в скважинах [Электронный ресурс] // Нефтегазовое дело. - 2002. - №2. - Режим доступа: http://ogbus.ru/authors/Khasanov/Khasanov_1.pdf
62. Ушаков А.В. Анализ теоретических предпосылок и экспериментальных исследований магнитной обработки водных и нефтяных систем // Трубопроводный транспорт: теория и практика. - 2015. - №3 (49). - С. 29-32.
63. Инюшин Н.В., Каштанова Л.Е., Лаптев А.Б., Мугтабаров Ф.К., Хайдаров Р.Ф., Халитов Д.М., Шайдаков В.В. Магнитная обработка промысловых жидкостей. Уфа: ГИИТЛ «Реактив», 2000. - 58-68 с.
64. Резонансно-волновой комплекс «Пилот-1» / НИИ ТС «Пилот». Презентация научно-исследовательского института технических систем «Пилот».
65. Исаков А.В. Активная защита оборудования от солеотложений // Инженерная практика. - 2014. - №02. - С. 10-11.
66. Лаптев А.Б. Методы и агрегаты для магнитогидродинамической обработки водонефтяных сред: дис. ... д-р тех. наук: 05.02.13 / Лаптев Анатолий Борисович. - Уфа, 2007.

67. Бородин В.И. и др. Результаты использования магнитных индукторов обработки нефти при ее добыче и транспорте // Нефтяное хозяйство. - 2004. - №4.
68. Барышников А.А. Исследование и разработка технологии увеличения нефтеотдачи за счет вытеснения с применением электромагнитного поля: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.17 / Барышников Александр Александрович. - Тюмень, 2014.
69. Экспериментальный стенд для исследования, комбинированного механомагнитного воздействия на стойкие нефтяные эмульсии [Электронный ресурс] // Республиканский молодежный инновационный конвент «Молодёжь – будущему республики Коми». - 2014. - Режим доступа: http://old.ugtu.net/sites/default/files/users/user_212/83_oskorbin.pdf.
70. Клабуков Б.Н. Неоднородность геологической среды по данным геофизических исследований // Геология и полезные ископаемые Карелии. - Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. -12 вып.
71. Гриффите Дж. Научные методы исследования осадочных пород. - М. : Мир, 1971.
72. Власов А. Н. Усреднение механических характеристик структурно-неоднородных природных материалов - скальных пород: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04 / Власов Александр Николаевич. - Ижевск, 2010.
73. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов. - М. : Высшая школа, 2003. - 9 изд. - 479 с.
74. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. - М. : Физматлит, 2006. - 816 с.
75. Кащавцев В.Е., Мищенко И.Т. Солеобразование при добыче нефти. - М. : Орбита - М, 2004. - 432 с.
76. Крешков А. П. Основы аналитической химии. - М. : Химия, 1971. - 2 т.
77. Матусевич Л. Кристаллизация в химической промышленности. - М. : Химия, 1968. - 304 с.

78. Ушаков А.В. Эффекты интенсификации процесса выпадения карбоната кальция и изменения реологических свойств нефти при воздействии магнитным полем на ОНФ - системы // Трубопроводный транспорт: теория и практика. - 2015. - №4 (50). - С. 28-33.
79. Пирвердян А.М. Защита скважинного насоса от газа и песка. - М. : Недра, 1986. - 120 с.
80. Рики Дж. Арментор, Майкл Р. Уайз, и др. Предотвращение выноса песка из добывающих скважин // Нефтегазовое обозрение. - 2007. - Т. 19. - № 2.
81. Тананыхин Д. С. Обоснование технологии крепления слабосцементированных песчаников в призабойной зоне нефтяных и газовых скважин химическим способом: дис. ... кан. техн. наук: 25.00.17 / Тананыхин Дмитрий Сергеевич. - СПб., 2013.
82. Ликвидация пескопроявлений – ликвидация вывода скважин из бездействия [Электронный ресурс] // ООО «Нефтегазтехнология». - 2012. - 02-06 апреля. - Режим доступа: [http://ngt.belitski.ru/Ликвидация пескопроявлений.pdf](http://ngt.belitski.ru/Ликвидация_пескопроявлений.pdf).
83. Бабазаде Э.М. Роль интеллектуальных скважин в осуществлении контроля над пескопроявлением. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений [Электронный ресурс] // Научные труды. - 2011. - Режим доступа: http://socar.az/1/Babazade_39-43.pdf.
84. Лаврентьев А.В., Антониади Д.Г., Савенок О.В., Березовский Д.А. Экспериментальные исследования механизмов гидродинамической устойчивости песчаника. - М. : Препринт, 2014.
85. Шакиров Э. И. Опыт применения технологий добычи и ограничения пескопроявления на пластах пачки ПК месторождений Барсуковского направления // Инженерная практика. - 2010. - № 2.
86. Мельниченко В. Е., Жданов А. С. Опыт работы оборудования УЭЦН в условиях повышенного содержания мехпримесей на месторождениях ОАО «Славнефть-Мегионнефтегаз» // Инженерная практика. - 2010. - № 2.

87. Соколов В. Н. Количественный анализ микроструктуры горных пород по их изображениям в раствор электронном микроскопе // Соревский образовательный журнал. - 1997. - № 8.
88. Осипов В.И., Соколов В.Н., Еремеев В.В. Глинистые покрышки нефтяных и газовых месторождений. - М. : Наука, 2001. - 238 с.
89. Клещенко И.И., Кузнецов Н.П., Ягафаров А.К., Лепнев Э.Н. Изучение структуры порового пространства коллекторов методами капиллярметрии // Вестник недропользователя ХМАО. - 2009. - № 12.
90. Ребиндер П. А. Физико-химическая механика. - М. : Знание, 1958.
91. Разрушение / под ред. Г. Либовица. - М. : Мир, 1976. - VII т.
92. Ушаков А.В. Эффекты диспергирования дисперсной минеральной фазы при магнитном воздействии на ОНФ - системы // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2015. - № 10. - С. 49-55.
93. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория поля. - М. : Физматлит, 2003. - 536 с.
94. Кузнецов В.Г. Литология. Осадочные горные породы и их изучение: Учеб. пособие для вузов. - М. : ООО «Недра - Бизнесцентр», 2007. - 511 с.
95. Рыжов А.Е. Особенности строения пустотного пространства пород-коллекторов ботубинского горизонта Чайядинского месторождения // Геология нефти и газа. - 2011. - № 4.
96. Коньгин С.Б., Иваняков С.В. Классификация и геометрические характеристики дисперсных систем. Методическое руководство к практическим занятиям по дисциплине «Дисперсные системы в промышленности». Самара: СамГТУ, 2006. - 32 с.
97. Гаврилова Н.Н. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов: учеб. Пособие. - М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. - 52 с.
98. Волков В.А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учебник по курсу Коллоидная химия для химико-технологических

- специальностей текстильных вузов и вузов легкой промышленности. - М. : МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2001. - 640 с.
99. Девис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии / под ред. Д. А. Родионова. - М. : Недра, 1990. - 399 с.
100. Литвинский Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов. - Донецк: Норд-Пресс, 2008. - 207 с.
101. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Кужель С.В. Масштабный эффект в горных породах. - Д. : АРТ-Пресс, 2004. - 132 с.
102. Катаев В. Н., Ерофеев Е. А. Краткий исторический обзор теоретического и практического опыта применения вероятностно-статистического метода в карстоведении // Современные проблемы науки образования. - 2013. - № 1. - С. 477-477.
103. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П. Проницаемость и фильтрация в глинах. - М. : Недра, 1986. - 160 с.
104. Кульчицкий Л.И. Роль воды в формировании свойств глинистых пород. - М. : Недра, 1975. - 212 с.
105. Осипов В. И., Соколов В. Н., Румянцева Н. А. Микроструктура глинистых пород / под ред. академика Е. М. Сергеева. - М. : Недра, 1989. - 211 с.
106. Росляк А.Т., Бирюков Ю.А., Пачин В.Н. Пневматические методы и аппараты порошковой технологии. - Томск: Издательство Томского Университета, 1990. - 272 с.
107. Самарханова А.С. Повышение эффективности применения магнитно-импульсной обработки руд с целью их разупрочнения перед измельчением: дис. ... канд. тех. наук: 25.00.20 / Самарханова Алла Сергеевна. - М., 2010.
108. Кузьмин М.И. Повышение эффективности эксплуатации нефтяных скважин в условиях намагниченности подземного оборудования: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.17 / Кузьмин Максим Игоревич. - СПб., 2013.

109. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Часть 1. Издание 3-е, дополненное. - М. : Наука, 1976. - V т. - 584 с.
110. Квасников И.А. Термодинамика и статистическая физика. Т.1: Теория равновесных систем: Термодинамика: Учебное пособие. Изд. 2-е, сущ. перераб. и доп. - М. : Едиториал УРСС, 2002. - 240 с.
111. Антониади Д. Г., Савенок О. В. Проблема солеотложения – общие принципы и особенности конкретных решений // Научный журнал КубГАУ. - 2013. - №87 (03).
112. Здольник С.Е. Управление солеотложением – залог повышения эффективности нефтедобычи // Инженерная практика: пилотный выпуск. - 2009. - С. 66–69.
113. Захаров С.Д., Мосягина И.В. Кластерная структура воды (обзор) // Физический институт им. П.Н Лебедева РАН. - М., 2011.
114. Глебов А. Н., Буданов А. Р. Структурно- динамические свойства водных растворов электролитов // Соровский образовательный журнал. - 1996. - №9.
115. Куневич А.В., Подольский А.В., Сидоров И.Н. Ферриты. Энциклопедический справочник. Том 1. Магниты и магнитные системы. - СПб. : Лик, 2004.
116. Патент РФ №38469. Устройство для магнитной обработки жидкости. Классы МПК: C10G33/02. Авторы: Шайдаков В.В., Лаптев А.Б., Максимочкин В.И., Емельянов А.В.. Патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Инжиниринговая компания «ИНКОМП-НЕФТЬ». Подача заявки: 2002-10-16, начало действия патента: 16.10.2002, публикация патента: 20.06.2004.
117. О предприятии [Электронный ресурс] // АО «Энергонефтемаш». - Режим доступа: <http://www.enm.omsk.ru/about/about.php>.
118. «МИОН». Система предотвращения отложений асфальтосмолопарафинов и защиты трубопровода от коррозии. Информация

о технологии [Электронный ресурс] // ООО «НПП «Лантан-1». - Режим доступа: <http://www.oil-tic.ru>.

119. Патент РФ №41462. Устройство для магнитной обработки жидкости. Классы МПК: C02F1/48. Авторы: Локшин Л.И., Кривоносов Ю.А., Недопёкин С.М., Лавринайтис Е.Л., Гейман А.В.. Патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Сервис подземного оборудования». Подача заявки: 2004-06-21, начало действия патента: 21.06.2004, публикация патента: 27.10.2004.

120. Ушаков А. В. Разработка комплексной методики защиты электроцентробежных насосов при эксплуатации в осложнённых условиях // Проблемы геологии и освоения недр: труды XVII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, Томск. - 2013. - С. 779-802.

121. Патент РФ №157504. Направляющий аппарат ступени погружного многоступенчатого электроцентробежного насоса. Классы МПК: F04D29/44, F04D13/10. Автор: Ушаков А.В.. Патентообладатель: Ушаков А.В.. Подача заявки: 2015-02-11, начало действия патента: 11.02.2015, публикация патента: 10.12.2015.

122. Ушаков А.В. Принципы моделирования процессов генерации ДМФ (дисперсной минеральной фазы) при пескопроявлении в условиях воздействия магнитными полем // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2015. - № 12. - С. 102-108.

123. Ушаков А.В. Принципы моделирования процесса солеотложения при магнитном воздействии на систему // Трубопроводный транспорт: теория и практика. - 2015. - №5 (51). - С. 31-33.

124. Хавкин А.Я. Нанотехнологии в добыче нефти и газа. - М. : Нефть и газ, изд. 2, 2008. - 171 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

[illegible]

