



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»

---

**Инженерная школа**

**Кафедра нефтегазового дела и нефтехимии**

Разумов Илья Константинович

**ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА УГЛЕВОДОРОДЫ И  
ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В НЕФТЕГАЗОВОЙ  
ОТРАСЛИ**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
*БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА*

по образовательной программе подготовки бакалавров  
по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело»  
профиль «Сооружение и ремонт объектов систем трубопроводного  
транспорта»

г. Владивосток  
2019



Студент РАЗУМОВ И.К. Руководитель ВКР  
« 24 » июня 20 19 г.

проф. д.т.н.  
Гульков АИ  
« 24 » 06 20 19 г.

«Допустить к защите»

Руководитель ОП к.т.н., доцент  
Никитина А.В.  
« 25 » 06 20 19 г.

Зав. кафедрой проф. д.т.н.  
Гульков АИ.  
« 24 » 06 20 19 г.

В материалах ВКР ~~не содержатся~~/содержатся  
(нужное подчеркнуть)  
сведения, составляющие государственную  
/коммерческую тайну и подлежащие экспортному  
контролю

Уполномоченный по экспортному контролю  
Петуков В.И.  
« 24 » июня 20 19 г.



Защищена в ГЭК с оценкой отлично

Секретарь ГЭК  
Л.В. Андреева  
« 1 » июль 20 19 г.





МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«Дальневосточный федеральный университет»

Инженерная школа

Кафедра Нефтегазового дела и нефтехимии

«СОГЛАСОВАНО»

Руководитель ООП,

К.Г.Н., доцент Шикитина А.В.

« 22 » 04 2019 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Зав. кафедрой ИИ ДиНХ, д.т.н., проф.

А.Н. Гульков

« 22 » 04 2019 г.

### ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы  
(бакалаврской работы)

по направлению подготовки 21.03.01 Нефтегазовое дело,  
профиль «Сооружение и ремонт объектов систем трубопроводного  
транспорта»

Студент (Ф.И.О.) Разумов Илья Константинович группа Б3403а

1. Тема ВКР: «Влияние магнитного поля на углеводороды и возможности его применения в нефтегазовой отрасли»

2. Направленность квалификационной работы: исследовательская

3. Тематика ВКР: предложена студентом

4. Перечень разрабатываемых вопросов (структура ВКР):

Аннотация на русском и английском языке.

4.1. Определение актуальности темы. Постановка цели и задач.

4.2. Свойства нефти и газа, изменяющиеся под действием полей.

4.3. Использование свойств магнитного поля при добыче нефти и газа.

4.4. Использование свойств магнитного поля при транспортировке нефти и газа.

4.5. Использование свойств магнитного поля при промысловой подготовке нефти и газа.

4.5. Альтернативные способы применения магнитного поля в нефтегазовой отрасли.

4.6. Расчет мощности магнетрона при разложении газогидратной пробки в НКТ.

4.7. Подбор магнетрона и определение времени его работы для разложения газогидратной пробки в НКТ.

4.8. Промышленная безопасность.

5. Перечень графического материала:

Графическая часть в виде презентации с раздаточным материалом

1. Цели и задачи

2. Свойства углеводородов и механизмы влияния на них с помощью МП и ЭМП

3. Уменьшение АСПО при добыче и транспортировке

4. Уменьшение коррозионных свойств, МИОНЫ

5. Борьба с гидратоотложениями при добыче и транспортировке

6. Обезвоживание, обессоливание, удаление механических примесей

7. Удаление механических примесей из газа, изменение вязкости и температуры застывания

8. Схема разрушения гидратной пробки в НКТ, результаты расчета

9. Подбор магнетронов, расчет времени их работы, указание недостатков



10. Документация по промышленной безопасности, экранирование волн

11. Заключение

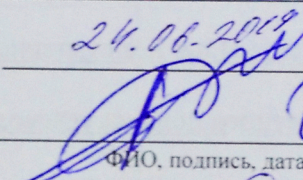
6. Дополнительные указания: Наличие презентации, выполнение научной главы в виде статьи

7. Календарный график выполнения ВКР

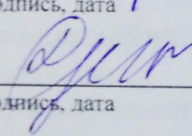
| № п/п | Наименование этапов             | Срок выполнения | Примечание |
|-------|---------------------------------|-----------------|------------|
| 1     | Общая часть (25%)               | 16.05.2019      | выполнено  |
| 2     | Научная глава (45 %)            | 05.06.2019      | выполнено  |
| 3     | Расчетная глава (25%)           | 15.06.2019      | выполнено  |
| 4     | Промышленная безопасность (5 %) | 18.06.2019      | выполнено  |
| 5     | Предзащита (100%)               | 24.06.2019      | выполнено  |

Дата выдачи задания 14.05.2019

Срок представления к защите 24.06.2019

Руководитель ВКР  Турмал А.М.

ФИО, подпись, дата

Студент РАЗУМОВ И.К.  24.06.2019

ФИО, подпись, дата



## **Аннотация**

В представленной работе проанализированы особенности состава нефти и газа, благодаря которым возможно влиять на свойства углеводородного сырья с помощью магнитного и электромагнитного воздействий. Были рассмотрены проводимые исследования воздействия полей на нефть и газ, на основании результатов была произведена оценка перспектив внедрения магнитной и электромагнитной обработок в производственные процессы.

В общей части рассмотрены такие свойства нефти, как вязкость, температуры застывания, склонность к образованию эмульсий и АСПО и механизмы влияния на них с помощью магнитных полей. В ходе изучения влияния полей на газ был изучен механизм разрушения газогидратов с помощью электромагнитного излучения.

В научно-исследовательской части был произведен поиск проводимых экспериментов по изучению влияния магнитных и электромагнитных полей на нефть и газ, произведен патентный поиск существующего оборудования магнитной и электромагнитной обработок углеводородов. На основании полученных данных была произведена оценка перспектив внедрения магнитной и электромагнитной обработок в производственные процессы.

В расчетной части произведен расчет мощности магнетрона для разрушения газогидратной пробки в насосно-компрессорной трубе. Были подобраны магнетроны различных фирм, рассмотрены недостатки, ограничивающие их применение.

В главе «Промышленная безопасность» представлен перечень документов, регулирующих работу приборов, излучающих магнитные и электромагнитные поля. Было выяснено, что излучение приборов необходимо экранировать с помощью защитных экранов с заземлением, а при эксплуатации прибора в насосно-компрессорных трубах экраном служит НКТ и обсадная колонна.

Работа состоит из 58 страниц, включает 7 формул, 9 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает в себя 59 источников.



## **Abstract**

The work about the features of oil and gas, which make possible to influence the properties of the hydrocarbon raw materials with the help of magnetic and electromagnetic fields. The ongoing studies of the impact of fields on oil and gas were reviewed, and based on the results, the perspectives for introducing magnetic and electromagnetic treatments into production processes were assessed.

Oil properties such as viscosity, pour point, tendency to form emulsions and ARPD and the mechanisms of influence on them using magnetic fields are considered in the general part. The effect of fields on gas, the mechanism of gas hydrates destruction using electromagnetic emitting was studied in the course of studying.

Experiments were conducted to study the effect of magnetic and electromagnetic fields on oil and gas, and a patent search was made for existing equipment for magnetic and electromagnetic processing of hydrocarbons in the research and development part. Based on the data obtained, an assessment was made of the prospects for the introduction of magnetic and electromagnetic treatments in production processes.

The magnetron power was calculated to destroy the gas hydrate plug in the tubing tube in the calculated part. The magnetrons of various companies were selected and the drawbacks limiting their use were considered.

The “Industrial Safety” part provides a list of documents regulating the operation of devices emitting magnetic and electromagnetic fields. It was found out that the emitting of the instruments must be shielded with the help of protective shields with grounding, and during operation of the instrument in the tubing it is the tubing and casing.

The work consists of 58 pages, includes 7 formulas, 9 figures and 6 tables. References includes 59 sources.

## Оглавление

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                        | 4  |
| 1 Общая часть .....                                                                  | 6  |
| 1.1 Свойства нефти, влияние магнитного поля на них .....                             | 6  |
| 1.1.1 Вязкость.....                                                                  | 6  |
| 1.1.2 Температура застывания.....                                                    | 7  |
| 1.1.3 Склонность к образованию эмульсий .....                                        | 8  |
| 1.1.4 Наличие в составе солей .....                                                  | 10 |
| 1.1.5 Склонность к образованию АСПО .....                                            | 11 |
| 1.2 Свойства газа, влияние магнитного поля на них .....                              | 12 |
| 1.2.1 Наличие в составе механических примесей .....                                  | 13 |
| 1.2.2 Склонность к образованию газогидратов .....                                    | 14 |
| 2 Научно-исследовательская часть.....                                                | 16 |
| 2.1 Применение магнитного поля при добыче и транспортировке нефти .....              | 16 |
| 2.1.1 Уменьшение осаждения АСПО в скважине .....                                     | 16 |
| 2.1.2 Уменьшение осаждения АСПО в трубопроводе.....                                  | 21 |
| 2.1.3 Снижение коррозионных свойств.....                                             | 22 |
| 2.2 Применение магнитного поля при добыче и транспортировке газа .....               | 23 |
| 2.2.1 Ликвидация газогидратных пробок .....                                          | 23 |
| 2.2.2 Борьба с гидратоотложениями в системах сбора.....                              | 24 |
| 2.3 Применение магнитного поля при промысловой подготовке нефти .....                | 25 |
| 2.3.1 Обезвоживание .....                                                            | 25 |
| 2.3.2 Обессоливание .....                                                            | 29 |
| 2.3.3 Удаление механических примесей .....                                           | 31 |
| 2.4 Применение магнитного поля при промысловой подготовке газа .....                 | 33 |
| 2.4.1 Удаление механических примесей .....                                           | 33 |
| 2.5 Альтернативные способы применения магнитного поля в нефтегазовой<br>отрасли..... | 35 |
| 2.5.1 Изменение вязкости нефти .....                                                 | 35 |
| 2.5.2 Изменение температуры застывания нефти .....                                   | 36 |



|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| 3 Расчетная часть.....                                              | 38 |
| 3.1 Расчет мощности излучения и времени работы излучателя.....      | 38 |
| 4 Промышленная безопасность .....                                   | 47 |
| 4.1 Нормативные документы в области промышленной безопасности ..... | 47 |
| Заключение .....                                                    | 49 |
| Список литературы .....                                             | 51 |

## Введение

Углеводородное сырье является неотъемлемой частью современной промышленности. Его вклад в развитие мировой цивилизации настолько велик, что полное исчезновение продуктов нефтегазовой отрасли привело бы к катастрофическим энергетическим и экономическим последствиям. Конечность ресурсов и высокая зависимость от них стимулируют поиск альтернативных источников энергии. Однако, несмотря на успехи в этом направлении, добиться полного и моментального отказа от углеводородов не получится, поэтому вопрос повышения эффективности технологических процессов, связанных с добычей, переработкой и транспортировкой углеводородного сырья, остается открытым.

Для того, чтобы добиться повышения эффективности эксплуатируемых на производстве установок и качества итогового продукта, необходимо внедрение инновационных технологий, которыми могут выступать нетрадиционные методы воздействия на углеводородное сырье. Все большее применение находят волновые безреагентные методы, основанные на действии следующих физических принципов:

- акустических;
- кавитационных;
- вибрационных;
- электрических;
- магнитных;
- микроволновых;
- лазерных.

Наиболее универсальными, эффективными, малозатратными и технически простыми являются методы магнитной и электромагнитной обработки, что стимулирует исследования их влияния на углеводороды.

В виду того, что УВ сырье является дисперсной системой с парамагнитными и диамагнитными молекулами в своем составе, открывается широкая возможность оказывать влияние на его физико-химические свойства с

помощью магнитных полей постоянного и переменного характера, что позволяет пересмотреть технологии добычи, подготовки, переработки и транспортировки, а также, что самое важное, усовершенствовать их.

Целью данной работы является рассмотрение механизмов влияния магнитных и электромагнитных полей на углеводородное сырье, изучение вариантов применения магнитной и электромагнитной обработки при добыче, промышленной подготовке, переработке и транспортировке сырья. Произвести расчет мощности излучателей электромагнитного поля при разложении газогидратных пробок, изучить нормативную документацию, регулирующую применение магнитных и электромагнитных полей на опасных производственных объектах.

Задачи исследования:

1. Рассмотрение свойств углеводородного сырья, на которые влияет магнитная обработка.

2. На основании полученных данных изучить преимущества, а также существующие и перспективные технологии магнитной обработки при добыче, подготовке и транспортировке углеводородов.

3. Произвести расчет количества теплоты, необходимого на разложение газогидратной пробки, образовавшейся в процессе эксплуатации насосно-компрессорной трубы. По полученным данным произвести расчет мощности излучателя электромагнитных волн и подбор аппарата, создающего электромагнитные волны.

4. Провести анализ промышленной безопасности представленных технологий.

В ходе исследований была написана статья по этой тематике и апробирована на международной конференции МК-26-19 и в виде статьи в сборнике статей конференции.



## **1 Общая часть**

### **1.1 Свойства нефти, влияние магнитного поля на них**

Нефть является сложной многокомпонентной взаиморастворимой смесью газообразных, жидких и твердых углеводородов с разнообразным химическим строением и количеством атомов углерода в молекулярной структуре. Помимо углеводородов в состав нефти так же входят вода, минеральные соли, растворы солей органических кислот, механические примеси и гетероатомные органические компоненты, такие как сернистые, азотистые, кислородные и металлоорганические соединения.

Наличие такого обширного числа элементов определяет физико-химические свойства всей системы, а парамагнитные или диамагнитные свойства компонентов влияют на ее поведения при нахождении в магнитном поле.

Каждый из этих элементов влияет на физико-химические свойства всей системы, а его парамагнитные или диамагнитные свойства определяют механизмы поведения нефти в магнитном поле [50].

В данной работе внимание будет уделено тем свойствам нефти, на которые оказывают влияние магнитные поля, что, в свою очередь, приводит к модернизации технологий добычи, обработки и транспортировки магнитообработанной нефти.

#### **1.1.1 Вязкость**

Данное свойство заключается в способности частиц жидкости или ее слоев сопротивляться взаимному перемещению друг относительно друга. Это свойство также называют внутренним трением, и связано оно с силами межмолекулярного взаимодействия жидкости [58].

Вязкость характеризует текучесть нефти и является характеристикой парафиновой нефти. При воздействии магнитного поля в нефти наблюдается резкое увеличение центров кристаллизации парафинов. Связано это с тем, что дисперсная частица в нефтяной дисперсной системе представляет собой центрально-симметричное образование с плотным ядром, образованным

парамагнитными молекулами. Вокруг данного ядра группируются ароматические, нафтеновые и парафиновые углеводороды в соответствии со значениями потенциалов парного взаимодействия, с постепенным понижением плотности потенциала межмолекулярного взаимодействия от центра частицы к ее периферии. В результате система, представленная данной частицей, не обладает каким-либо электрическим зарядом. В результате же наложения на данную систему магнитного поля наблюдается возбуждение молекул углеводородов и гетеросоединений, что приводит к синглет-триплетным переходам электронов и гомолитической диссоциации, результатом чего служит резкое увеличение количества парамагнитных центров. Вновь образованные центры участвуют в создании новых дисперсных частиц, но уже меньшего размера. Это уменьшение первоначальных дисперсных частиц приводит к гомогенности системы в целом, но гомогенизацией процесс не ограничивается.

При отсутствии внешнего ориентирующего фактора надмолекулярные образования, представленные парамагнитными ядрами и сольватными оболочками, находятся в нефти в хаотическом состоянии. В присутствии же магнитного поля вызывается упорядочивание системы, происходит переориентация молекул таким образом, что направление спинов неспаренных электронов совпадает с вектором внешнего магнитного поля. При этом взаимное расположение молекул и надмолекулярных образований меняется, за счет чего искажается их геометрия, что приводит к освобождению иммобилизованной части слоев, окружающих парамагнитное ядро.

Результатом служит появление новой структуры нефтяной дисперсной системы с еще большей гомогенностью и парамагнитной активностью, что приводит к понижению вязкости и поверхностного натяжения [33].

### **1.1.2 Температура застывания**

Температурой застывания принято обозначать температуру, при которой нефть в стандартных условиях теряет подвижность. Из-за обилия компонентов

в составе сырья температура застывания не обозначена столь же четко, как температура кристаллизации индивидуальных веществ.

Колеблется в довольно широких пределах, так, экстремально низкая температура застывания зарегистрирована у эхабинской нефти ( $-62^{\circ}\text{C}$ ), а самая высокая – у тасбулатской ( $+35^{\circ}\text{C}$ ). Обусловлено это высоким и низким содержанием парафина соответственно. Дело в том, что температура застывания нефти зависит от ее состава, а именно – чем больше содержание парафина в смеси, тем выше ее температура застывания. Смолистые вещества оказывают противоположное действие [47].

Данное свойство как раз и основано на свойствах индивидуальных компонентов. Температура кристаллизации парафина выше, чем нефти, в состав которой он входит, что приводит к смещению температуры застывания нефти в сторону температуры кристаллизации парафина.

В результате магнитной обработки, как было рассмотрено выше, происходит разрушение ассоциатов, образованных разнополярными молекулами и ионами, увеличивается дисперсность парамагнитных центров, что способствует снижению температуры застывания всей смеси, так как мелкодисперсные кристаллы парафина при кристаллизации оказывают меньшее влияние на систему в целом.

Как мы можем видеть, данный механизм тесно связан с механизмом изменения вязкости при магнитной обработке, так как в обоих случаях причиной изменения свойств служит наличие в нефти парафина и его концентрация [53].

### **1.1.3 Склонность к образованию эмульсий**

Эмульсией называется система двух или более взаимонерастворимых или слаборастворимых друг в друге жидкостей, в которых одна диспергирована в другой в виде микроскопических капель – глобул.

Существует два типа эмульсий: вода в нефти, что встречается чаще и более характерно в процессе добычи, и нефть в воде, что встречается реже и более характерно для сточных вод, подвергающихся дальнейшей очистке.



Образование эмульсий наблюдается при движении нефти по скважинам, в ходе которого происходит интенсивное перемешивание с пластовыми водами, и на различных стадиях переработки, где также наблюдается контакт нефти с водой [31].

Механизм образования эмульсий объясняется поверхностными явлениями на границах раздела фаз. Данная граница в виде поверхностного слоя характеризуется определенным поверхностным натяжением, то есть силой, с которой жидкость сопротивляется увеличению своей поверхности. Наличие в нефти эмульгаторов – поверхностно-активных веществ, способных снижать энергию, необходимую для создания свободной поверхности раздела фаз, за счет чего адсорбирующихся на поверхности раздела смешивающихся фаз – снижает поверхностное натяжение, в результате чего происходит образование устойчивых к разрушению эмульсии. Концентрация эмульгаторов у поверхности раздела фаз значительно выше, чем во всем объеме смеси, поэтому они играют роль бронирующих оболочек [47].

Любая эмульсия будет образовываться лишь в том случае, когда за счет механического воздействия будет вызвано диспергирование. Чем выше степень диспергирования, тем затруднительнее разрушение эмульсий, так как при меньшем размере глобул процесс коагуляции с дальнейшим гравитационным отстаиванием практически не наблюдается из-за уравнивания гравитационных сил межмолекулярными.

В настоящее время в нефтяной промышленности наблюдается устойчивая тенденция к ухудшению извлекаемых запасов нефти, что приводит к удорожанию добычи и подготовки сырья традиционными способами. Данная тенденция мотивирует искать, изучать и внедрять альтернативные способы подготовки нефти. К такому относится способ магнитной обработки.

Согласно теории А.А. Вальцова, основным механизмом разрушения водонефтяных эмульсий в магнитном поле является воздействие последнего на бронирующие оболочки дисперсной фазы с дальнейшим их разрыхлением вследствие перемещения в них соединений железа под влиянием магнитного

поля. Данная теория, однако, требует глубокого исследования водонефтяных эмульсий с целью определения количества соединений железа в сырье и факта их нахождения в бронирующем слое в достаточном разрушения эмульсии количестве.

Другая теория предполагает, что магнитное поле своим воздействием выталкивает нефтяную фазу, как более сильного диамагнетика, по сравнению с водой, в сторону ослабления магнитного поля, что можно использовать для ускорения гравитационного разделения фаз [34].

Вероятно также влияние магнитного поля на каждую глобулу водонефтяной эмульсии типа «нефть в воде», что проявляется в изменении геометрической формы последней. В результате воздействия происходит сплющивание дисперсной фазы параллельно магнитным линиям, так как компоненты нефти имеют намного более сильную отрицательную магнитную восприимчивость, чем вода. В эмульсии типа «вода в нефти» происходит растягивание глобул воды вдоль магнитных линий под воздействием давления окружающей их нефти, подвергающейся в разы более сильному диамагнитному выталкиванию, чем вода. В результате изменения геометрической формы дисперсной фазы с шара на любую другую увеличивается площадь ее поверхности, уменьшается толщина бронирующего слоя ввиду обратной зависимости от площади поверхности при установленной концентрации эмульгатора. Уменьшение бронирующего слоя приводит к интенсификации деэмульсации [30].

#### **1.1.4 Наличие в составе солей**

В составе добываемой нефти растворены такие соли, как хлориды натрия, кальция и магния, реже карбонаты и сульфаты, которые попадают в нее вместе с пластовыми водами.

Наличие солей приводит к таким осложнениям в процессах добычи, обработки и транспортировки, как засорение и коррозия аппаратуры. Во избежание осложнений технологических процессов и их удорожания в связи с обслуживанием и ремонтом необходимо проводить глубокое обессоливание



нефти до поступления последней на перегонку в атмосферные ректификационные колонны [46].

Осуществляется это двумя основными методами обессоливания:

1) промывкой нагретой нефти пресной водой и отделение воды с экстрагированными солями и механическими примесями в специальных аппаратах-отстойниках;

2) модифицированным первым методом, применимым для высокосернистой нефти и отличающимся интенсификацией отделения минерализованной воды в аппаратах с генерацией электрического поля – аппаратах-электродегидраторах.

При попадании в магнитное поле нефти, содержащей в своем составе растворенные соли, происходит образование центров кристаллизации структурообразующих компонентов нефти. За счет увеличения центров кристаллизации и сопутствующему этому увеличению дисперсности наблюдается повышение концентрации солей в нефтяной дисперсной системе. Это явление не улучшает процесс обессоливания, наоборот, извлечения солей и осаждения их вместе с водой не происходит [26].

### **1.1.5 Склонность к образованию АСПО**

В составе нефти присутствуют парафины, смолы и асфальтены, являющиеся тяжелыми компонентами нефти и способные отлагаться на внутренней поверхности нефтепромыслового оборудования, образуя асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО), что затрудняет ее добычу, транспорт и хранение. Для дальнейшего восстановления эффективности оборудования необходима его механическая чистка или горячая промывка, а это приводит к простоям оборудования и удорожанию его обслуживания. В связи с этим необходимо проводить борьбу с АСПО, а разработка новых ее методов остается актуальным вопросом [56].

К наиболее перспективному физическому методу предупреждения АСПО относится магнитная обработка. Ее эффективность обусловлена следующим. Диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные компоненты определяют

магнетизм АСПО, при этом ферромагнитные компоненты, представленные в нефти в виде примесей железа, которые сформированы микрокристаллами окислов железа, являются микромагнитами. При отсутствии магнитного индуктора эти частицы прилипают к поверхности ферромагнитной трубы, по которой транспортируются, за счет магнитного притяжения, тем самым выступая в качестве центров кристаллизации АСПО. В магнитном индукторе значительная часть ферромагнитных частиц задерживается на пути потока нефти, происходит накопление этих частиц в процессе протекания нефти через индуктор. Далее эти частицы, ввиду ориентации в магнитном поле определенным образом и дополнительного подмагничивания им, объединяются в крупные фрагменты за счет притяжения их разноименных полюсов. В результате образуется замкнутая магнитная система, не обладающая результирующей намагниченностью. Эти фрагменты более не могут притягиваться к ферромагнитному материалу трубы, поэтому они движутся вместе с общим объемом нефти, при этом не являясь более центрами кристаллизации асфальтенов, смол и парафинов [53].

Парамагнитные асфальтены тоже играют роль центров кристаллизации парафиновых углеводородов, но при воздействии магнитного поля также происходит их слипание в объеме нефти за счет магнитного взаимодействия.

## **1.2 Свойства газа, влияние магнитного поля на них**

Природным газом называют газ, большой объем которого представляет метан – от 70 до 98% - более тяжелые его гомологи: этан, пропан и бутан. В составе также могут находиться и другие вещества, не относящиеся к углеводородному ряду, а именно: водород, сероводород, углекислый газ, азот, кислород, инертные газы, влага и механические примеси [45].

Воздействие на природный газ магнитным полем обусловлено присутствием в газе парамагнитных веществ. Ими выступают газы, которые обладают большим эффектом Зеемана, что объясняет их парамагнитную природу. Такими газами выступают кислород и оксиды азота, однако, по причине их низкой концентрации в природном газе и, что самое главное,

неспособности сил магнитного поля через магнитный момент этих газов остановить процесс хаотичного теплового движения молекул газа, влияние это крайне низко в масштабах газового потока [48].

Наряду с газами в составе могут присутствовать и механические примеси, обладающие собственной магнитной восприимчивостью, что позволяет влиять на их поведение в газовом потоке с помощью магнитного поля [51].

Еще одним механизмом воздействия служит воздействие через сверхвысокочастотное электромагнитное излучение на молекулы воды, растворенные в газе. Молекула воды обладает дипольным моментом, что позволяет электрической компоненте электромагнитных волн ускорять ее движение, а дальнейшее межмолекулярное трение приводит к поглощению этого излучения и увеличению температуры вещества [43].

Рассмотрим подробнее те свойства природного газа, на которые оказывают видимое влияние магнитные и электромагнитные поля, что, в свою очередь, приводит к модернизации технологий добычи, обработки и транспортировки природного газа.

### **1.2.1 Наличие в составе механических примесей**

Помимо газообразной составляющей природный газ имеет в своем составе механические примеси, представленные порообразующими компонентами, продуктами коррозии, солями. Их наличие порождает локальную эрозию металла внутренней поверхности труб, образует нагар на рабочих органах компрессоров и приводит к появлению отложений на поверхности труб и оборудования.

Существуют следующие методы удаления механических примесей из природного газа:

- 1) «мокрое» улавливание;
- 2) «сухое» улавливание;
- 3) магнитодинамические методы;
- 4) комбинирование нескольких методов.



Однако существующие методы несовершенны и не всегда позволяют добиться нужной глубины очистки, из-за чего проблема удаления механических примесей остается актуальной и вызывает интерес к поиску альтернативных методов ее решения.

Одним из таких методов является метод магнитной обработки природного газа.

Суть метода заключается в коагуляции парамагнитных веществ, представленных в газе в виде механических примесей. Частицы примесей под действием магнитного поля закрепляются на магнитной поверхности установки, через которую проходит поток газа, выступая в качестве центров коагуляции с дальнейшим образованием агломератов, которые при достижении критического размера срываются потоком газа с магнитной поверхности. Далее процесс очистки газа от получившихся агломератов упрощается ввиду их укрупненных размеров, что способствует процессу осаждения или фильтрации [42].

### **1.2.2 Склонность к образованию газогидратов**

Газовыми гидратами обозначают твердые кристаллические соединения, образовавшиеся при определенных термобарических условиях из воды и газа. Газогидраты являются метастабильным минералом, образование и разложение которых зависит от температуры, давления и других факторов.

Склонность природного газа к образованию газогидратов связана с наличием в нем влаги, наблюдающейся при добыче и неполноты его обезвоживания при промысловой подготовке к транспорту. При достижении определенных термобарических условий происходит образование молекулами воды ажурного каркаса, полости которого в дальнейшем занимают молекулы газа. Связывание молекул воды и газа происходит за счет Ван-дер-Ваальсовых сил. Дальнейшее комбинирование полостей между собой приводит к образованию сплошных структур, а именно кубической, тетрагональной и гексагональной.

Образование газогидратов при эксплуатации оборудования оказывает негативное влияние на процессы добычи, подготовки и транспортировки газа. В результате гидратообразования в призабойной зоне и стволах скважин осложняется процесс добычи углеводородов, уменьшаются дебиты скважин. При отложении газовых гидратов на стенках трубопроводов для транспорта увеличиваются энергетические затраты на транспортирование газа ввиду повышения гидравлического сопротивления газопровода. Присутствие газогидратов в потоках извлекаемого газа приводит к эрозионному износу сборных коллекторов, тем самым уменьшая срок их эксплуатации и увеличивая ремонтные затраты на их замену. Образование в системах промышленной подготовки природного газа ухудшает выполняемые технологические процессы.

Данная проблема порождает множество негативных эксплуатационных и экономических проблем, поэтому требует своего решения. Одним альтернативных решений борьбы с уже образовавшимися газовыми гидратами служит метод сверхвысокочастотного воздействия. Суть его заключается в воздействии электромагнитными волнами на молекулы воды, составляющие кристаллическую структуру. Наличие у молекулы воды дипольного момента определяет ее поведение в электромагнитном поле сверхвысокой частоты и позволяет электрической компоненте волн заставлять вращать молекулу в такт своей частоте и ускорять ее движение. Все это приводит к дальнейшему межмолекулярному трению, за счет чего происходит повышение энергии газогидратной системы, проявляющееся в увеличении кинетической энергии молекул воды, что приводит к нагреву системы и дальнейшему ее разрушению. Именно этим механизмом обосновывается затухание электромагнитных волн при прохождении через гидрат [26].

За счет этого данный метод считается весьма перспективным как для ликвидации уже образовавшихся газогидратных пробок в системах транспорта природного газа, так и для разложения их в системах сбора, особенно при эксплуатации месторождений при низких температурах северных районов.

## **2 Научно-исследовательская часть**

### **2.1 Применение магнитного поля при добыче и транспортировке нефти**

#### **2.1.1 Уменьшение осаждения АСПО в скважине**

Опираясь на пример экономии энергоресурсов в процессе борьбы с накипеобразованием с помощью магнитного поля [36, 37], ООО «ПермНИПИнефть» создает и патентует скважинные магнитные аппараты типа МАС на основе мощных металлокерамических магнитных материалов. Эффективность предупреждения осаждения АСПО была испытана в условиях месторождений Пермской области в течение 5 лет [21].

Выбор скважин для установки магнитных аппаратов осуществлялся согласно степени потребности скважины в защите от АСПО и результатам лабораторных исследований эффективности магнитной обработки нефти месторождения.

На рисунке 1 приведены результаты анализа работы скважин наиболее представительного месторождения Пермской области. Всего магнитными аппаратами были оснащены 23 скважины, а период работы с целью получения результатов составил от 1 до 4 лет.



| Технологические параметры работы скважин           |               |           |               |                        |    |    |               |       |       |                            |               |                |    |    |               |       |       |
|----------------------------------------------------|---------------|-----------|---------------|------------------------|----|----|---------------|-------|-------|----------------------------|---------------|----------------|----|----|---------------|-------|-------|
| ПРС и промывки при ПРС                             |               |           |               |                        |    |    |               |       |       | Промывки скважин           |               |                |    |    |               |       |       |
| Период работы                                      | Число скважин | Число ПРС |               | Число промывок при ПРС |    |    |               |       |       | Период работы              | Число скважин | Число промывок |    |    |               |       |       |
|                                                    |               | общее     | на I скважину | общее                  |    |    | на I скважину |       |       |                            |               | общее          |    |    | на I скважину |       |       |
|                                                    |               |           |               | СТБ                    | ГН | МЛ | СТБ           | ГН    | МЛ    |                            |               | СТБ            | ГН | МЛ | СТБ           | ГН    | МЛ    |
| До установки МА                                    |               |           |               |                        |    |    |               |       |       | До установки МА            |               |                |    |    |               |       |       |
| I год (базовый)                                    | 23            | 48        | 2,087         | 7                      | 3  | 3  | 0,304         | 0,130 | 0,130 | I год (базовый)            | 23            | 5              | 46 | 1  | 0,217         | 2,0   | 0,043 |
| После установки МА                                 |               |           |               |                        |    |    |               |       |       | После установки МА         |               |                |    |    |               |       |       |
| I год                                              | 23            | 27        | 1,174         | 7                      | 0  | 1  | 0,304         | 0     | 0,043 | I год                      | 23            | 1              | 28 | 0  | 0,043         | 1,217 | 0     |
| II год                                             | 15            | 24        | 1,600         | 0                      | 0  | 2  | 0             | 0     | 0,133 | II год                     | 15            | 2              | 19 | 0  | 0,133         | 1,268 | 0     |
| III год                                            | 12            | 9         | 0,75          | 0                      | 0  | 1  | 0             | 0     | 0,083 | III год                    | 12            | 2              | 21 | 0  | 0,167         | 1,75  | 0     |
| IV год                                             | 6             | 4         | 0,667         | 0                      | 0  | 0  | 0             | 0     | 0     | IV год                     | 6             | 0              | 9  | 0  | 0             | 1,500 | 0     |
| Технологический эффект, рассчитанный на I скважину |               |           |               |                        |    |    |               |       |       |                            |               |                |    |    |               |       |       |
| от снижения числа ПРС и промывки при ПРС           |               |           |               |                        |    |    |               |       |       | от снижения числа промывок |               |                |    |    |               |       |       |
| I год                                              |               |           | 0,913         |                        |    |    | 0             | 0,130 | 0,067 | I год                      |               |                |    |    | 0,174         | 0,783 | 0,043 |
| II год                                             |               |           | 0,487         |                        |    |    | 0,304         | 0,130 | 0,003 | II год                     |               |                |    |    | 0,084         | 0,733 | 0,043 |
| III год                                            |               |           | 1,337         |                        |    |    | 0,304         | 0,130 | 0,047 | III год                    |               |                |    |    | 0,050         | 0,350 | 0,043 |
| IV год                                             |               |           | 1,420         |                        |    |    | 0,304         | 0,130 | 0,130 | IV год                     |               |                |    |    | 0,217         | 0,500 | 0,043 |

Рисунок 1 – Исходные технологические параметры и результаты расчета технологического эффекта от работы скважин с магнитными аппаратами от 1 до 4 лет за счет снижения числа ПРС и промывок скважин на одном из месторождений Пермской области

В таблице, отображенной на рисунке, представлены технологические характеристики работы скважин за год (базовый) до внедрения технологии магнитной обработки добываемого сырья, а также за последующие годы эксплуатации скважины после ее внедрения. Приводится общее число подземных ремонтов скважин (ПРС) с выделенными промывками при ПРС и дифференциацией по средствам промывок: стабикаром (СТБ), горячей нефтью (г.н.) и раствором МЛ-80 (МЛ).

Результатами исследования выявлена тенденция снижения каждого вида обработок скважин и уменьшения их числа с каждым последующим годом работы скважины с магнитным аппаратом. В среднем после установки магнитных аппаратов за 4 года произошло сокращение подземных ремонтов в 2 раза, промывок стабикаром – в 2,5 раза, горячей нефтью – в 1,5 раза.

Важным моментом является то, что применение стабикаров было востребовано лишь в первый год работы скважин после установки магнитных аппаратов, в дальнейшие годы эксплуатации надобность в них отпала. Это обусловлено состоянием оборудования скважин, а именно свойствами и

количеством АСПО, осевшего на обсадной трубе за время работы скважин без магнитных аппаратов. Следовательно, установка магнитных аппаратов приводит к снижению образования проблемных для удаления АСПО, что избавляет от затрат на дорогостоящие промывки стабикаром или другими растворителями, тем самым продлевая нормальный режим работы скважин.

По результатам технологической эффективности выявлено абсолютное изменение всех показателей в сторону их снижения за каждый год работы скважины. Наряду с данными о приросте добытого углеводородного сырья и учетом амортизационных отчислений от стоимости магнитных аппаратов эти параметры дают представление о величинах и тенденциях роста экономического эффекта. Рассчитано, что каждая скважина, оборудованная магнитным аппаратом, позволяет получить экономический эффект до 300 тысяч рублей и исключает потери потребителя даже при коэффициенте успешности 10%. Фактически же показатель успешности по результатам промышленных испытаний в течение 5 лет достигает 90% [21].

Другим примером внедрения МАС служит компания АО «Томскнефть» ВНК, эксплуатируемые месторождения которой располагаются в Томской области. Результаты применения скважинных магнитных аппаратов представлены в таблице 1 [23].

Таблица 1 – Результаты применения скважинных магнитных аппаратов по состоянию на 01.10.1999 г.

| № скважины | Дата установки МАС | Глубина установки МАС, м | Межочистной период НКТ, сут |                     | Число подъемов НКТ в год |                     | Продолжительность ремонта, дней |                     |
|------------|--------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|
|            |                    |                          | до установки МАС            | после установки МАС | до установки МАС         | после установки МАС | до установки МАС                | после установки МАС |
|            |                    |                          | 2416                        | 17.05.97            | 1000                     | 17                  | 300                             | 4                   |
| 1544       | 15.04.97           | 1200                     | 20...25                     | 598                 | 2                        | 1                   | 9                               | 4                   |
| 2075       | 08.04.97           | 1198                     | 60...90                     | 409                 | 4                        | 3                   | 16                              | 8                   |
| 552        | 07.02.98           | 1350                     | 182                         | 400                 | 3                        | 2                   | 7                               | 7                   |
| 628        | 26.01.98           | 1009                     | 60..90                      | 518                 | 3                        | 0                   | 10                              | 0                   |
| 2017       | 03.02.98           | 1013                     | 22                          | 134                 | 5                        | 2                   | 17                              | 6                   |
| 970        | 05.02.98           | 1209                     | 60...90                     | 402                 | 5                        | 1                   | 12                              | 3                   |

Продолжение таблицы 1

|      |          |      |         |     |   |   |    |   |
|------|----------|------|---------|-----|---|---|----|---|
| 617  | 10.02.98 | 1080 | 300     | 226 | 2 | 2 | 5  | 5 |
| 2018 | 17.06.97 | 1364 | 60...90 | 470 | 6 | 0 | 25 | 4 |
| 2409 | 13.03.98 | -    | 30      | 99  | 4 | 0 | 15 | 0 |

Из таблицы видно, что магнитная обработка пластовых флюидов магнитными активаторами типа МАС многократно увеличивает межочистной и межремонтный периоды работы скважин. В среднем межочистной период увеличился в 8 раз, при его максимальном приросте на скважине 1544 в 24 раза.

Продолжительность межремонтного периода зависит не только от скорости отложения АСПО, но и других факторов, например, межремонтного пробега насосов ШГН и ЭЦН, качества их ремонта, степени износа оборудования и др. В таблице 2 представлена выборка тех ремонтов, которые связаны только с наличием АСПО или солей в колонне насосно-компрессорных труб.

Таблица 2 – Статистические показатели ремонтов скважин с МАС по состоянию на 01.10.1999 г.

| № скважины | Число ремонтов с АСПО и солями |       | Время эксплуатации, мес |       |
|------------|--------------------------------|-------|-------------------------|-------|
|            | без МАС                        | с МАС | без МАС                 | с МАС |
| 2416       | 2                              | 1     | 6                       | 25    |
| 1544       | 2                              | 1     | 6                       | 19    |
| 2075       | 4                              | 2     | 16                      | 27    |
| 552        | 2                              | 0     | 15                      | 17    |
| 628        | 1                              | 0     | 12,5                    | 17    |
| 2017       | 3                              | 1     | 12,5                    | 17    |
| 970        | 4                              | 1     | 12,5                    | 17    |
| 617        | 2                              | 1     | 8,5                     | 16,5  |
| 2018       | 4                              | 0     | 12                      | 12,5  |

Из таблицы видно достаточно большой разброс в показателях числа и частоты ремонта. Это обусловлено различным дебитом скважин и составом добываемой нефти. Усреднение полученных показателей по 9 скважинам показывает, что частота ремонта, связанная с наличием в насосно-компрессорных трубах только АСПО и солей, уменьшается в 5,76 раза.



Результатом применения магнитных аппаратов служит то, что за весь период эксплуатации (1997-1999 гг.) не наблюдалось осложнений в добыче и подготовке нефти независимо от сезона и режима эксплуатации [23].

Также известны малогабаритные высокоградиентные магнитные индукторы обработки нефти (МИОН), разработанные и запатентованные ЦНТ «ЛАНТАН» на основе постоянных магнитов [14, 15]. Известно исполнение в виде трубного типа, представленного на рисунке 2, и штангового типа, представленного на рисунке 3.

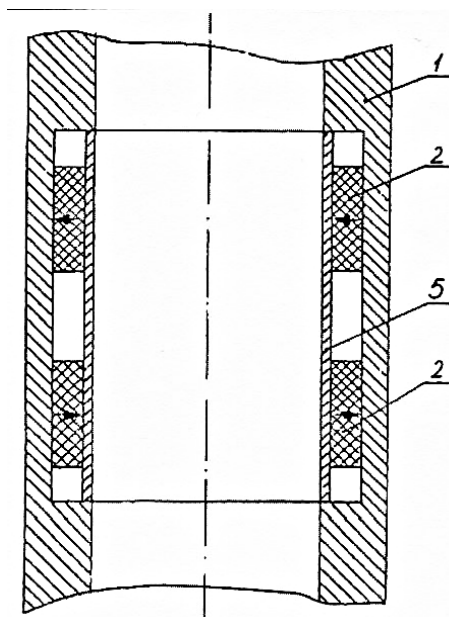


Рисунок 2 – Схема устройства МИОНа трубного типа:

1 – ферромагнитная труба с цилиндрическим пазом; 2 – кольцевые магниты; 5 – внутренняя труба для потока жидкости из немагнитного материала.

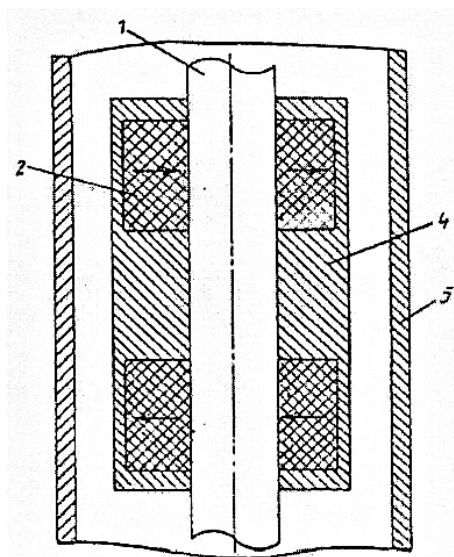


Рисунок 3 – Схема устройства МИОНа штангового типа:

1 – штанга; 2 – кольцевые магниты; 4 – центраторы; 5 – НКТ.

Внедрение МИОНов в производственный процесс дало следующие результаты:

1. С 1 июня 2001 года по 1 января 2005 года в ОАО «Удмуртнефть» на 235 скважинах различных месторождений было установлено 425 магнитных индукторов, общая наработка которых составила 134 000 суток. Количество горячих обработок за данный период сократилось на 1505.

2. В ОАО «Белкамнефть» на 52 скважинах было установлено 92 магнитных индуктора. Общая наработка в 29 600 суток привела к уменьшению числа горячих обработок на 442 [20].

Все это служит гарантией получения высоких экономических показателей, а также свидетельствует о возможности и целесообразности профилактического внедрения аппаратов магнитной обработки в скважины с признаками осложнения АСПО [18, 24].

### **2.1.2 Уменьшение осаждения АСПО в трубопроводе**

Месторождения Томской области, эксплуатируемые АО «Томскнефть» ВНК, наряду со скважинными магнитными аппаратами были оснащены трубопроводными магнитными активаторами (МАТ). Размещение производилось на кустах обводненных скважин с высокопарафинистой нефтью.

До установки магнитных трубопроводных аппаратов на кустах 207 и 192 нефтесборный коллектор (НСК) необходимо было очищать от АСПО в среднем один-два раза за квартал, в зимний период число увеличивалось. К моменту очистки давление в коллекторе возрастало с 1,8 до 2,8 МПа, что превышало заданный технологический режим на 1,0 МПа.

С целью уменьшения парафиноотложения в трубопроводе НСК на кусте 207 после замерной установки «Спутник» 30.04.1997 г. был установлен трубопроводный магнитный активатор. Давление в НСК было порядка 1,9 МПа, по истечении 683 дней давление изменилось незначительно. За это время чистка с помощью агрегата для депарафинизации (АДП) была проведена три раза, в то время, как без магнитного трубопроводного аппарата она проводилась около 10 раз. Аварий на трубопроводе не происходило.

С той же целью немного позднее была произведена установка магнитного активатора на трубопроводе НСК на кусте 207. Дата установки – 16.05.1998 г. В результате число АДП уменьшилось в 12 раз – один раз в три месяца против четырех раз в месяц до установки МАТ [23].

Данный промышленный эксперимент показал эффективность магнитообработки добытого сырья в качестве профилактики образования АСПО. Благодаря установке МАТ достигается снижение затрат на очистку от АСПО и уменьшение времени простоя нефтесборных коллекторов.

### **2.1.3 Снижение коррозионных свойств**

Наличие в добываемой нефти растворенных солей повышает ее агрессивность, что приводит к дальнейшей коррозии металла, являющейся основной причиной отказов нефтепромысловых трубопроводов. Перекачиваемая продукция агрессивно влияет на внутреннюю поверхность трубы, создавая условия для образования продуктов коррозии, поэтому важным условием повышения безопасности эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов является увеличение эффективности существующих средств противокоррозионной защиты.



Обработка соледержащей нефти приводит к увеличению количества центров кристаллизации и сопутствующему этому повышению дисперсности солей в углеводородном продукте. Такое изменение приводит к уменьшению негативного влияния агрессивных компонентов на стенки нефтепромысловых трубопроводов. Связано это с тем, что при высокой дисперсности солей они уносятся потоком нефти, поэтому уменьшение кристаллов приводит к затруднению отложения на стенках трубы.

Применение технологии магнитной обработки нефти было осуществлено в промышленных условиях компаний АО «Томскнефть» ВНК [23].

Установка магнитных трубопроводных активаторов была осуществлена в трубопроводах НСК на кустах 207 и 192, что привело к снижению числа очисток коллектора в 2,5 и 12 раз соответственно.

Установка магнитных скважинных активаторов произвели на нескольких скважинах, в результате чего также произошло снижение числа ремонтов в среднем в 5,76 раз. Результаты применения скважинных магнитных аппаратов для снижения отложений солей в насосно-компрессорных трубах представлены в таблицах 1 и 2 [23].

## **2.2 Применение магнитного поля при добыче и транспортировке газа**

### **2.2.1 Ликвидация газогидратных пробок**

Промысловые испытания электромагнитного метода борьбы с газогидратными пробками были проведены на специальном экспериментальном участке шлейфа длиной 16 метров, подключенного к одной из скважин Ефремовского месторождения Харьковской области в Украине [19].

В ходе эксперимента создавался гидратный режим на линии шлейфа, приводящий к образованию газогидратной пробки. После полного закупоривания шлейфа гидратной пробкой производилось включения генератора СВЧ. Импульсная мощность генератора составляла 90 кВт, средняя мощность – 60 кВт. Возбуждение электромагнитных волн в линии шлейфа производилось с помощью специального устройства ввода СВЧ-энергии. В

результате воздействия сверхвысокочастотных волн происходило полное разрушение газогидратной пробки. Процесс занимал около 30 минут.

Данное явление происходит из-за наличия у молекул воды собственного электрического поля, то есть они представляют собой диполи даже в отсутствие внешнего электрического поля. При изменении внешнего электромагнитного поля происходит изменение направления ориентации диполей вслед за ним. Так как газогидраты представляют собой кристаллические соединения и молекулы воды в их структуре более или менее жестко связаны с другими молекулами, то тепловое движение молекул в системе отсутствует [38]. Постоянное же изменение направления ориентации молекул воды приводит к увеличению внутренней энергии системы, что ведет к ее нагреву, увеличению кинетической энергии молекул газовых гидратов, нарушению Ван-дер-Ваальсовых связей и дальнейшему разрушению газогидратной структуры [19].

### **2.2.2 Борьба с гидратоотложениями в системах сбора**

Метод борьбы с гидратообразованием посредством электромагнитных полей сверхвысоких частот перспективен не только для ликвидации уже образовавшихся газогидратных пробок, но и для борьбы с гидратоотложениями в системах сбора газа [26].

Для реализации метода необходимо выбрать технологическую схему электромагнитного воздействия на образующиеся гидраты и необходимый комплекс сопутствующего электромагнитного оборудования. Разнообразие конструкций и параметров скважин и трубопроводов открывают широкие варианты реализации метода на практике.

Наиболее простым считается вариант, в котором излучатель в виде петли или штыря помещается внутрь насосно-компрессорной трубы, за счет чего воздействие электромагнитного поля происходит только внутри трубы, не выходя за ее пределы. Питание для такого излучателя подается от СВЧ генератора, располагающегося на поверхности. Возможно также непосредственное присоединение магнетрона к насосно-компрессорной трубе, в результате чего электромагнитное поле будет генерироваться самой трубой, а

его мощность будет определяться размерами внутренней поверхности НКТ. Энергозатраты для разложения 1 м<sup>3</sup> газогидрата в таком случае составят около 2000 кВт · ч [26].

Использование метода электромагнитного метода разрушения газогидратных отложений эффективнее и экономичнее всего применять на тех участках эксплуатируемого объекта, на которых гидратообразование в ходе технологического процесса наблюдается чаще всего.

## **2.3 Применение магнитного поля при промышленной подготовке нефти**

### **2.3.1 Обезвоживание**

Процесс обезвоживания нефти на установке промышленной обработки нефти (УППН) может быть осложнен тем, что нефть с водой ввиду их взаимной нерастворимости друг в друге способны создавать эмульсии типа «нефть в воде» и «вода в нефти», разрушение которых бывает крайне ресурсоемко.

Сами по себе молекулы воды обладают дипольным моментом, однако капли воды, состоящие из огромного количества таких молекул, не обладают однородностью заряда, так как хаотическое расположение молекул в капле и их безостановочное тепловое движение исключают самопроизвольное проявление в ней дипольных явлений. Именно эти капли и являются глобулами в водонефтяной дисперсной системе.

При наложении же на водонефтяную смесь магнитного поля переменного характера наблюдается превращение капель в диполи с вытекающей из этого строгой ориентацией отдельных диполей. Одинаковая напряженность магнитного поля во всех точках диполи и равенство у нее положительного и отрицательного зарядов приводит к ее растяжению. Растяжение же вызывает увеличение площади поверхности глобулы из-за отклонения формы капли от формы с наименьшим поверхностным натяжением – сферической формы. Таким образом, по достижении уравнивания сил поверхностного натяжения и электростатических сил внутреннего давления произойдет разрыв капли [30].

В ходе лабораторных испытаний на модели водонефтяной эмульсии, приготовленной из нефти с плотностью 896 кг/м<sup>3</sup> с содержанием воды 20%, с

использованием деэмульгаторов СНПХ 4315Д, Рекод 118, Лапрол 4202, Лапрол 6003, Реапон 4В, LML 4312 были получены результаты, представленные в таблице 3 [34].

Таблица 3 – Оценка эффективности воздействия магнитного поля на эмульсию совместно с деэмульгаторами

| Обезвоживание нефтяной эмульсии, % |        |        |        |        |        |         |         |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 15 мин                             | 30 мин | 45 мин | 60 мин | 75 мин | 90 мин | 105 мин | 120 мин |
| СНПХ 4315 Д                        |        |        |        |        |        |         |         |
| 12,5                               | 25     | 25     | 27,5   | 30     | 30     | 45      | 50      |
| 10                                 | 20     | 25     | 25     | 25     | 37,5   | 40      | 45      |
| 5                                  | 20     | 25     | 26,3   | 30     | 37,5   | 50      | 50      |
| 10                                 | 25     | 40     | 47,5   | 50     | 52,5   | 60      | 60      |
| Рекод 118                          |        |        |        |        |        |         |         |
| 30                                 | 45     | 45     | 52,5   | 52,5   | 55     | 55      | 57,5    |
| 0                                  | 25     | 25     | 25     | 25     | 25     | 25      | 27,5    |
| 55                                 | 55     | 62,5   | 75     | 75     | 75     | 75      | 75      |
| 100                                | 100    | 100    | 100    | 100    | 100    | 100     | 100     |
| Лапрол 4202                        |        |        |        |        |        |         |         |
| 0                                  | 0      | 0      | 2,5    | 5      | 7,5    | 10      | 10      |
| 0                                  | 0      | 2,5    | 5      | 7,5    | 7,5    | 10      | 10      |
| 0                                  | 0      | 2,5    | 5      | 7,5    | 10     | 12,5    | 20      |
| 0                                  | 0      | 2,5    | 5      | 12,5   | 15     | 17,5    | 20      |
| Лапрол 6003                        |        |        |        |        |        |         |         |
| 0                                  | 0      | 0      | 2,5    | 5      | 7,5    | 10      | 10      |
| 0                                  | 0      | 0      | 5      | 5      | 5      | 5       | 7,5     |
| 0                                  | 0      | 0      | 2,5    | 2,5    | 2,5    | 7,5     | 7,5     |
| 0                                  | 0      | 0      | 5      | 12,55  | 12,5   | 15      | 15      |
| Реапон 4В                          |        |        |        |        |        |         |         |
| 0                                  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0       |
| 0                                  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0       |
| 0                                  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0,5     | 1       |
| 0                                  | 2,5    | 2,5    | 2,5    | 2,5    | 2,5    | 5       | 7,5     |



| LML 4312 |    |      |      |      |    |    |      |
|----------|----|------|------|------|----|----|------|
| 45       | 70 | 75   | 75   | 75   | 75 | 75 | 77,5 |
| 50       | 75 | 77,5 | 80   | 80   | 80 | 80 | 80   |
| 12,5     | 42 | 75   | 75   | 77,5 | 80 | 80 | 80   |
| 25       | 75 | 85   | 87,5 | 87,5 | 90 | 95 | 100  |

В ходе эксперимента использовалась методика Bottle Test. Отстой дисперсной смеси протекал при температуре 22°C. Серии экспериментов проводились с каждым из реагентов, в каждой серии:

- в отстойнике №1 разрушение эмульсии проводилось химическим методом без влияния магнитного поля;

- в отстойнике №2 химический метод применяли соосно с воздействием постоянного магнитного поля при расположении источника под отстойником;

- в отстойнике №3 химический метод применяли соосно с воздействием постоянного магнитного поля при расположении источника над отстойником;

- в отстойнике №4 химический метод применяли соосно с воздействием переменного магнитного поля при расположении источника вокруг отстойника.

Проведение замеров происходило каждые 15 минут, каждый эксперимент длился 2 часа.

По результатам эксперимента было выявлено, что применение магнитных полей с каждым реагентом дает различные результаты. Так, постоянное магнитное поле при использовании СНПХ 4315 Д не дало изменений в динамике и глубине обезвоживания, при использовании других деэмульгаторов наблюдалось как улучшение динамики, так и ее ухудшение в случае с реагентом Рекод 118. Иначе дела обстоят при применении переменного магнитного поля: во всех случаях наблюдается увеличение объема отделяемой воды с увеличением времени отстаивания, при применении же деэмульгатора Рекод 118 наблюдается куда более хороший результат, заключающийся в 100%-ом обезвоживании уже через первые минуты отстаивания эмульсии.

В целом можно сказать, что при расположении магнита под отстойником происходит ухудшение процесса деэмульгирования, что расходится с предположением о выталкивании нефтяной фазы в противоположную от магнита сторону. Расположение же источника магнитного поля над отстойником улучшает динамику и глубину обезвоживания нефти, что, скорее всего, происходит из-за притягивания к магниту некоторых компонентов нефти, то есть оттягивание их от нижней части отстойника, в которой происходит осаждение воды.

После оценки полученных данных несложно заметить, что воздействие на водонефтяные эмульсии переменным магнитным полем гораздо эффективнее воздействия постоянного магнитного поля. Однако, магнитное воздействие малоэффективно без использования реагентов-деэмульгаторов [34].

В результате исследования влияния магнитной обработки на эффективность обезвоживания нефти месторождений Грозненского района Чеченской Республики [28] были получены результаты, представленные в таблице 4.

Таблица 4 – Экспериментальные данные по разделению водонефтяных эмульсий

| Номер образца | Содержание воды в эмульсии, % | Степень обезвоживания эмульсии, % |                                   |                                    |                                  |
|---------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
|               |                               | Термоотстой                       | С МО без добавления деэмульгатора | Без МО с добавлением деэмульгатора | С МО с добавлением деэмульгатора |
| 1             | 1,2                           | 69                                | 74                                | 79                                 | 98                               |
| 2             | 2,9                           | 51                                | 69                                | 75                                 | 94                               |
| 3             | 5,0                           | 38                                | 57                                | 63                                 | 90                               |

Магнитообработка проводилась на проточной установке с индукцией магнитного поля 0,1375 Тл, линейной скоростью потока 1м/с. Обработанная жидкость собиралась в делительной воронке и отстаивалась до получения четкой неприрастающей границе раздела фаз.

Исследования показали, что использование магнитной обработки улучшает обезвоживание водонефтяной эмульсии, а ее применение совместно с

деэмульгаторами увеличивает степень обезвоживания на 5-30%. Предварительная же обработка раствора с деэмульгатором позволяет снизить его расход на 15-20% [28].

Другое исследование показало, что магнитная обработка переменным полем с частотами от 30 до 70 Гц увеличивает степень обезвоживания эмульсии на 10-12% [31].

Таким образом, на установках подготовки нефти возможно достичь большего эффекта разбиения водонефтяной эмульсии, причем без внедрения нового оборудования, а с помощью модернизации уже эксплуатируемых установок подготовки промышленных слоев, то есть путем добавления к термохимическому способу разбиения эмульсии электромагнитного. Немаловажен также выбор соответствующего реагента-деэмульгатора, что можно осуществить только экспериментальным подбором.

### **2.3.2 Обессоливание**

В процессе эксплуатации нефтяных скважин вместе с нефтью на поверхность извлекаются вода с растворенными в ней различными солями, мельчайшими частицами глины, песка, крупинками кристаллов солей и другими примесями. По мере заглубления скважин содержание воды в водонефтяных эмульсиях возрастает и может достигать до 90% от общего объема добытого сырья. Большая часть воды извлекается на промысле, а оставшаяся (0,5 – 1,5% мас.) – на установках подготовки нефти [34].

Поскольку соли растворимы в воде и почти нерастворимы в углеводородах, то процесс обезвоживания сопровождается обессоливанием нефти. Чем больше воды и солей отделяется на промысле, тем выше экономичность, безопасность и экологичность дальнейших процессов транспортировки и переработки углеводородного сырья.

Негативными последствиями наличия в нефти солей являются их отложение в эксплуатируемых установках, что приводит к сокращению срока их службы, увеличение коррозионной активности нефти, отравление катализаторов нефтепереработки, снижение производительности оборудования.

Поэтому приоритетным направлением является усовершенствование существующих методов обессоливания нефти и поиск альтернативных методов [26].

Одним из таких является метод магнитной обработки. Его перспективность кроется в улучшении разделения водонефтяной эмульсии. Увеличение глубины разделения эмульсии на 20 – 30% приводит к сопутствующему этому увеличению вывода растворенных в извлекаемой воде солей.

В ходе экспериментального исследования влияния постоянного магнитного поля на эффективность обессоливания парафинистой нефти Грозненского района было выявлено, что наибольший эффект в обессоливании нефти достигается при ее обработке ультразвуком и магнитным полем в присутствии деэмульгатора.

При проведении эксперимента сырую нефть нагревали до 50 °С, добавляли в нее воду в количестве 0,5% мас., смешивали с 25 ppm деэмульгатора и 1,0% отработанного масла. Полученная смесь проходила через проточную установку с ультразвуковым устройством и магнитным тоннелем, затем собиралась в делительной воронке и отстаивалась до четкой неприрастающей границы раздела фаз. Применяемые величины магнитной индукции равнялись 0,15 Тл, 0,31 Тл и 0,8 Тл.

В результате термоотстоя с деэмульгатором без обработки магнитным и ультразвуковым полем содержание хлоридов составило 2,2 мг/дм<sup>3</sup>, применение же магнитного поля улучшило этот показатель до 0,9 мг/дм<sup>3</sup>, 0,7 мг/дм<sup>3</sup> и 1,0 мг/дм<sup>3</sup> при магнитной индукции 0,8 Тл, 0,15 Тл и 0,31 Тл соответственно. Из полученных значений видно, что магнитное поле улучшает степень обессоливания более чем в 2 раза. Использование же соосно с магнитным полем ультразвука дает улучшение обессоливания до 0,1 мг/дм<sup>3</sup>. [35]

Полученные результаты показывают, что благодаря применению магнитного поля возможно улучшить процесс обессоливания, снизить

содержание хлоридов до концентрации менее 1,0 мг/дм<sup>3</sup>. Комбинирование магнитного поля с ультразвуком позволяет достигнуть еще большего понижения концентрации солей, что можно использовать уже на существующих установках подготовки нефти.

### 2.3.3 Удаление механических примесей

Наличие механических примесей в углеводородном сырье делает нефтяные дисперсные системы более сложными и непредсказуемыми. Удаление их из сырья проводится методом отстоя и методом фильтрации. Первый прост, но требует большого парка резервуаров и длительного времени. Второй – быстрый, но требует подбора фильтрующего материала. Поэтому использование данных методов полностью не решает проблему очистки сырья от механических примесей и требует повышения эффективности удаления механических примесей из нефти. Повысить эффективность на действующих установках возможно путем внедрения альтернативных методов, а именно воздействием на сырье магнитными полями.

При исследовании влияния магнитного поля на удаление механических примесей [27] была построена зависимость степени очистки от величины магнитной индукции, представленная на рисунке 4.

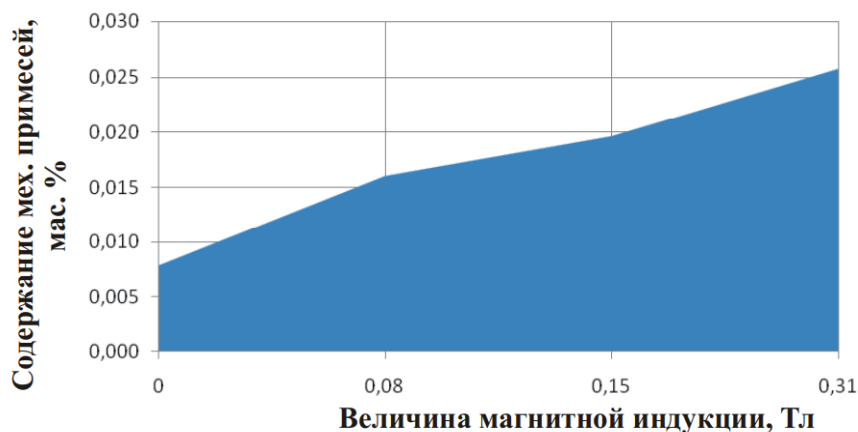


Рисунок 4 – Влияние магнитной активации на отделение механических примесей

Объектом исследования послужил газоконденсат Астраханского месторождения и его широкая фракция с температурой начала кипения в 350°С. Магнитная обработка углеводородного сырья осуществлялась на проточной



лабораторной установке с использованием магнитного туннеля [16]. Выбор интервалов исследования основывался на литературных данных и предварительных экспериментов эффективности режимов магнитной обработки.

По окончании эксперимента были получены следующие данные. При воздействии магнитного поля с малой величиной магнитной индукции (0,08 Тл) при последующем фильтровании количество задерживаемых мелкодисперсных механических примесей увеличивается почти вдвое, при индукции 0,15 Тл – в 2,5 раза, при индукции 0,31 Тл – в 2,5 – 3 раза. По результатам исследования была построена зависимость степени удаления механических примесей от величины магнитной индукции, представленная на рисунке 2.

Также в данном эксперименте изучалась зависимость степени очистки углеводородного сырья от воздействия ультразвуковой обработки и совместной обработки продукта ультразвуком и магнитным полем. Результатом совместной обработки сырья послужило снижение содержания механических примесей до 15 раз, использование же волоконного титанового материала способно увеличить это значение до 30 раз.

Причиной такого поведения механических примесей послужил их состав. При атомно-адсорбционном анализе осадка на фильтре после очистки газоконденсата и его фракции было выяснено, что осадок содержит значительное количество железа, алюминия, кальция, магния, ванадия и хрома. Эти элементы в чистом виде или в виде соединений друг с другом могут обладать ферромагнитными свойствами, чем и обуславливается влияние магнитной обработки на их осаждение. С помощью фотоколориметрического анализа установлено, что с увеличением магнитной индукции уменьшается размер дисперсных частиц газоконденсата [27].

Таким образом, предварительная магнитная обработка углеводородного сырья магнитным полем в процессе первичной подготовки позволяет увеличить степень очистки продукта от механических примесей и снизить затраты при дальнейшей переработке.

## **2.4 Применение магнитного поля при промышленной подготовке газа**

### **2.4.1 Удаление механических примесей**

Природный газ в своем составе кроме газообразной составляющей имеет минерализованную воду и механические примеси, представленные порообразующими компонентами, продуктами коррозии, солями. Данные компоненты инициируют локальную эрозию металла внутренней поверхности трубопровода, что сокращает срок службы последнего.

В связи с этим возникает необходимость очистки природного газа от содержащихся в нем механических примесей до допустимых пределов. Несовершенство существующих методов очистки приводит к поиску более эффективных альтернативных методов. Одним из таких может служить метод магнитной обработки потока газа.

Суть метода заключается в коагуляции парамагнитных частиц в газе, осажденных на магнитной поверхности, образование из этих частиц агломератов, которые по достижении определенного размера будут неспособны удерживаться на магнитной поверхности, что приведет к их дальнейшему уносу потоком природного газа. Дальнейшее удаление данных частиц будет упрощено ввиду их укрупненного размера.

В ходе изучения данного процесса [42] была создана магнитная установка, представляющая собой проточную часть, выполненную на основе постоянных магнитов цилиндрической формы, закрепленных на специальных пластинах в корпусе. Расчет проводился для реальных условий перекачки при давлении 2,75 – 3,9 МПа, эксперименты были произведены для устройств диаметром 159, 273, 325, 426 и 530 мм.

В ходе определения магнитной силы, действующей на частицу конечной величины в магнитном поле, было выяснено, что с увеличением радиуса магнита сила, удерживающая частицу на его поверхности, уменьшается. Связано это с тем, что плотность магнитной энергии вблизи поверхности магнита будет больше у магнита, объем которого меньше, а магнитная сила, действующая на частицу, пропорциональна градиенту плотности магнитной

энергии. За рабочий был принят магнит диаметром 10 мм, высотой 10мм и с магнитной индукцией 1,15 Тл.

Рассматривалось влияние на частицы гематита ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), пирротина ( $\text{Fe}_7\text{S}_8$ ) и магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) диаметром 10, 50 и 100 мкм.

В ходе эксперимента на устройстве с диаметром 159 мм были получены следующие данные:

1. Для частиц размером 10 мкм:

- гематит закрепляется на поверхности магнита при давлении 0,2 МПа и менее;

- пирротин закрепляется при давлении 3,3 МПа и менее;

- магнетит закрепляется на магнитной поверхности при любом значении давления.

2. Для частиц размером 50 мкм:

- гематит закрепляется на поверхности при давлении 0,8 МПа и менее;

- пирротин закрепляется при любом давлении;

- магнетит закрепляется при любом давлении.

3. Для частиц размером 100 мкм:

- гематит закрепляется на поверхности при давлении 1,2 МПа и менее;

- пирротин закрепляется при любом давлении;

- магнетит закрепляется при любом давлении.

При проведении эксперимента на установке с диаметром 530 мм выяснилось, что частицы пирротина и магнетита также закрепляются на магнитной поверхности при любом давлении, а частицы гематита:

- при размере 10 мкм закрепляются при давлении 0,8 МПа и ниже;

- при размере 50 мкм закрепляются при давлении 2,3 МПа и ниже;

- при размере 10 мкм закрепляются при давлении 3,8 МПа и ниже.

При изменении диаметра магнита с 10 мм на 3 мм частицы с диаметром 10 мкм уже способны закрепляться на магните при давлении 3,1 МПа и ниже.

Связаны полученные данные с соотношением силы трения, представляющей собой произведение магнитной силы и коэффициента трения,

и силы сопротивления, возникающей в результате воздействия на частицу газового потока определенной скорости. Увеличение скорости газового потока приводит к увеличению сопротивления, поэтому можно добиться закрепления частиц гематита путем уменьшения скорости. Также улучшение закрепления частиц можно получить при помощи изменения диаметра магнитов [42].

Результаты эксперимента показали перспективность использования магнитного поля при обработке природного газа.

## **2.5 Альтернативные способы применения магнитного поля в нефтегазовой отрасли**

### **2.5.1 Изменение вязкости нефти**

Вязкость характеризует текучесть нефти и является характеристикой парафиновой нефти. При воздействии магнитным полем в нефти наблюдается резкое увеличение центров кристаллизации парафинов. Связано это с тем, что дисперсная частица в нефтяной дисперсной системе представляет собой центрально-симметричное образование с плотным ядром, образованным парамагнитными молекулами. Вокруг данного ядра группируются ароматические, нафтеновые и парафиновые углеводороды в соответствии со значениями потенциалов парного взаимодействия. В результате система, представленная данной частицей, не обладает каким-либо электрическим зарядом. После наложения на данную систему магнитного поля наблюдается возбуждение молекул углеводородов и гетеросоединений, что приводит к резкому увеличению количества парамагнитных центров.

Результатом служит появление новой структуры нефтяной дисперсной системы с большей гомогенностью и парамагнитной активностью, что приводит к понижению вязкости и поверхностного натяжения.

При воздействии постоянным магнитным полем на Западно-Казахстанскую нефть наблюдалось снижение динамической вязкости на 23,6%. Динамическая вязкость модифицированной депрессантом нефти после обработки в магнитном поле уменьшилась на 40,3% [31].

В ходе изучения влияния магнитного поля на вязкость Таймурзинской нефти также было получено снижение динамической вязкости с 778,1 мПа · с до 605,0 мПа · с [36].

Данное свойство возможно применять в процессе добычи и транспортировки нефти. Уменьшение вязкости нефти при перемещении ее по скважине дает снижение энергетических затрат на ее добычу, а совмещение метода термической подготовки высоковязкой нефти с методом магнитной обработки позволит снизить энергетические затраты на транспортирование нефти через систему трубопроводного транспорта.

Однако не всегда возможно извлечь пользу снижения вязкости нефти при обработке в магнитном поле. Дело в том, что спустя некоторое время в нефти наблюдается частичное или полное восстановление ее реологических свойств. Время релаксации для каждой нефти индивидуально и может занимать от нескольких минут до нескольких часов. Однако, несмотря на это, данный метод остается перспективным для нефти с большим периодом релаксации.

### **2.5.2 Изменение температуры застывания нефти**

Температура застывания нефти обуславливается наличием в ее составе парафина и смол – чем больше содержание парафина в смеси, тем выше ее температура застывания. Смолистые вещества оказывают противоположное действие.

Температура кристаллизации парафина выше, чем нефти, в состав которой он входит, что приводит к смещению температуры застывания нефти в сторону температуры кристаллизации парафина.

В результате магнитной обработки происходит разрушение ассоциатов, образованных разнополярными молекулами и ионами, увеличивается дисперсность парамагнитных центров, что способствует снижению температуры застывания всей смеси, так как мелкодисперсные кристаллы парафина при кристаллизации оказывают меньшее влияние на систему в целом.

При изучении влияния магнитной обработки на нефть месторождения им. Корчагина были получены данные, представленные в таблице 5 [17].



Таблица 5 – Зависимость физико-химических свойств нефти месторождения им. Корчагина от магнитной обработки

| № | Способ обработки | Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup> | Кинематическая вязкость при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с | Температура застывания, °С |
|---|------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------|
| 1 | Без обработки    | 834                                    | 11,4                                                  | -4                         |
| 2 | МО 0,08 Тл       | 815                                    | 9,9                                                   | -14                        |
| 3 | МО 0,15 Тл       | 813                                    | 9,37                                                  | -16                        |
| 4 | МО 0,31 Тл       | 807                                    | 8,63                                                  | -16                        |

Из таблицы видно, что с увеличением магнитной индукции температура застывания снижается. Однако спустя некоторое время происходит релаксация смеси, и нефть частично или полностью восстанавливает свои первоначальные свойства. Время релаксации для каждой нефти индивидуально и может занимать от нескольких минут до нескольких часов.

В связи с этим тяжело применить методу практическое применение, разве что во избежание застывания при кратковременном нахождении в области температур, близких к температуре застывания, например, при добыче и транспортировки высокопарафинистой углеводородной смеси до установок подготовки нефти в условиях низких температур [17].

### **3 Расчетная часть**

#### **3.1 Расчет мощности излучения и времени работы излучателя**

В качестве расчета будет произведен расчет мощности излучателя сверхвысокочастотных электромагнитных полей, необходимой для разрушения газогидратной пробки, возникшей внутри насосно-компрессорной трубы.

В основе метода разложения гидрата лежит свойство диэлектриков поляризоваться под воздействием внешнего электромагнитного поля. Именно таким свойством обладает газогидрат, чем обуславливается затухание в нем электромагнитных волн. Поглощенная гидратом энергия волны приводит к повышению его внутренней энергии, что приводит к его нагреву и разложению [40].

Ввод электромагнитной энергии во внутритрубное пространство насосно-компрессорной трубы производится за счет опускания в нее излучателя электромагнитных волн, подключенного к генератору, располагаемому на поверхности. Излучателем может служить магнетрон, нашедший свое массовое применение в микроволновых печах. При достижении газогидратной пробки на излучатель подается питание, возбуждающее в нем высокочастотные токи. Возникает мощный поток электромагнитных волн сверхвысокой частоты, который затихает в газогидратной пробке, передавая ей свою энергию. Принципиальная схема представлена на рисунке 5.

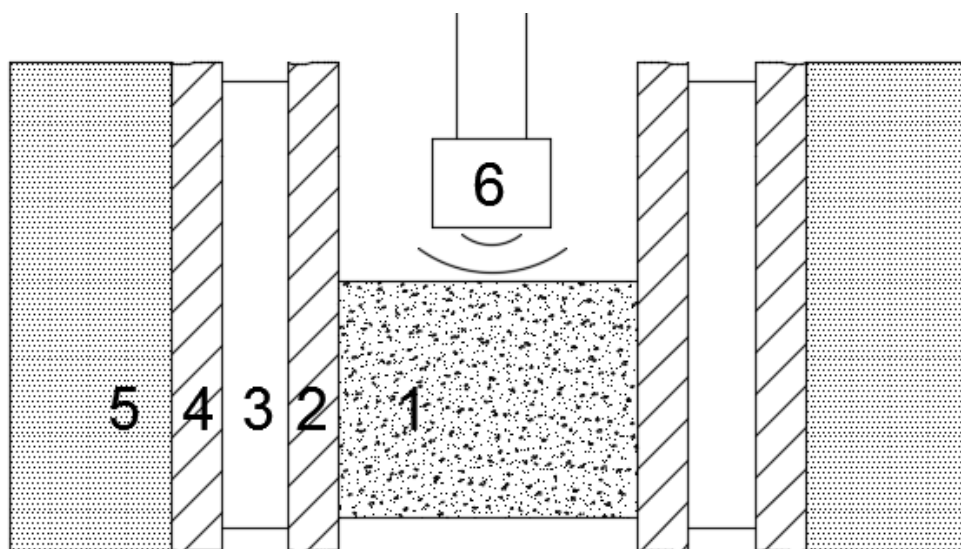


Рисунок 5 – Принципиальная схема возбуждения электромагнитных волн для разложения газогидратной пробки

1 – газогидратная пробка; 2 – насосно-компрессорная труба; 3 – межтрубное пространство; 4 – обсадная колонна; 5 – окружающие породы

Для нахождения мощности излучателя электромагнитных волн необходимо определить количество тепла, требуемого для разложения газогидрата.

В качестве исходных данных были взяты промышленные данные газогидратных образований Средневилюйского газоконденсатного месторождения, расчетной была принята насосно-компрессорная труба скважины этого же месторождения [48]. В ходе анализа промышленных данных было выбрано сечение скважины на глубине 250 метров, так как при термобарических условиях этой глубины необходим наибольший подвод тепла для достижения температуры разложения газогидрата. Удельная теплота плавления газогидрата была взята на основании экспериментальных исследований термодинамических свойств газовых гидратов [22]. Из серии экспериментов было выбрано наибольшее значение, чтобы получить максимально энергозатратный результат. В качестве марки стали для НКТ была выбрана сталь Ст20, удельная теплоемкость которой взята при температуре 100°C, так как в марочнике значения указаны для температур от 100 до 500°C [59].

Таблица 6 – Исходные данные

|                                                           |        |
|-----------------------------------------------------------|--------|
| Внутренний радиус НКТ $R_1$ , м                           | 0,066  |
| Внешний радиус НКТ $R_2$ , м                              | 0,075  |
| Глубина скважины $H$ , м                                  | 250    |
| Давление в скважине $P$ , МПа                             | 20,225 |
| Температура в скважине $T_H$ , К                          | 268,3  |
| Температура в разложения газогидрата $T_K$ , К            | 294,9  |
| Удельная теплоемкость газогидрата $c_1$ , Дж/(кг · К)     | 2880   |
| Плотность газогидрата $\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>        | 913    |
| Удельная теплоемкость стали $c_2$ , Дж/(кг · К)           | 469    |
| Плотность стали $\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>              | 7850   |
| Удельная теплота плавления газогидрата $\lambda$ , кДж/кг | 411    |

При работе излучателя электромагнитных волн происходит нагрев газогидрата до температуры разложения и непосредственно его разложение. Поэтому необходимо рассчитать количество теплоты, которое потребуется на нагрев газогидрата до нужной температуры и полное его разложение. Так же нужно учесть, что в ходе нагрева газогидрата теплота также расходуется на нагрев стенок насосно-компрессорной трубы. В ходе расчета примем допущение, что длина трубы равна длине газогидратной пробки, хотя на самом деле потери теплоты на нагрев стенки трубы значительно больше ввиду размеров трубы, превышающих размер пробки в сотни раз, и большой теплопроводности металла. В ходе расчета длина газогидратной пробки была приравнена 1 метру.

Основой для расчета количества теплоты служит формула (3.1) [51], для которой значение массы находится по известной геометрической форме насосно-компрессорной трубы:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T, \quad (3.1)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость вещества, Дж/(кг · К);

$m$  – масса вещества, кг;

$\Delta T$  – изменение температуры, К.

Количество теплоты, необходимое для нагрева насосно-компрессорной трубы от начальной температуры до температуры плавления гидрата, находится по формуле (3.2):

$$Q_1 = \pi \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot c_2 \cdot \rho_2 \cdot (T_k - T_n), \quad (3.2)$$

где  $R_1$  – внутренний радиус насосно-компрессорной трубы, м;

$R_2$  – внешний радиус насосно-компрессорной трубы, м;

$c_2$  – удельная теплоемкость стали, Дж/(кг · К);

$\rho_2$  – плотность стали, кг/м<sup>3</sup>;

$T_k$  – температура разложения газогидрата, К;

$T_n$  – температура скважины до начала нагрева, К.

$$Q_1 = 3,14 \cdot (0,075^2 - 0,066^2) \cdot 469 \cdot 7850 \cdot (294,9 - 268,3) = 390423 \text{ Дж.}$$

Количество теплоты, необходимое для нагрева газогидратной пробки от начальной температуры до температуры разложения, находится по формуле (3.3):

$$Q_2 = \pi \cdot R_1^2 \cdot c_1 \cdot \rho_1 \cdot (T_k - T_n), \quad (3.3)$$

где  $R_1$  – то же, что в формуле (3.2);

$c_1$  – удельная теплоемкость газогидрата, Дж/(кг · К);

$\rho_1$  – плотность газогидрата, кг/м<sup>3</sup>;

$T_k$  – то же, что в формуле (3.2);

$T_n$  – то же, что в формуле (3.2).

$$Q_2 = 3,14 \cdot 0,066^2 \cdot 2880 \cdot 913 \cdot (294,9 - 268,3) = 957156 \text{ Дж.}$$

Количество теплоты, необходимое для полного разложения газогидратной пробки находится по формуле (3.4):

$$Q_3 = \pi \cdot R_1^2 \cdot \rho_1 \cdot \lambda, \quad (3.4)$$

где  $R_1$  – то же, что в формуле (3.2);

$\rho_1$  – то же, что в формуле (3.3);

$\lambda$  – удельная теплота плавления газогидрата, Дж/кг.

$$Q_3 = 3,14 \cdot 0,066^2 \cdot 913 \cdot 411000 = 5135117 \text{ Дж.}$$



Суммарное количество теплоты для полного разрушения газогидратной формуле находится по формуле (3.5):

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (3.5)$$

$$Q = 390423 + 957156 + 5135117 = 6482696 \text{ Дж} = 6482,696 \text{ кДж}.$$

Зная итоговое количество теплоты, необходимое для полного разрушения газогидратной пробки, находим мощность электромагнитного излучателя по формуле (3.6) [43]:

$$P = \frac{A}{t}, \quad (3.6)$$

где  $A$  – работа электромагнитного излучателя, равная количеству теплоты, необходимой для полного разложения газогидратной пробки, Дж;

$t$  – время работы электромагнитного излучателя, с.

Рассмотрим мощность магнетрона при полном разложении газогидрата в течение одного часа.

$$P = \frac{6482696}{3600} = 1800,749 \text{ Вт}.$$

Мощность современных бытовых магнетронов варьируется от 500 до 1700 Вт, мощность промышленных магнетронов может достигать 2500 Вт. Рассмотрим свойства некоторых магнетронов и время их воздействия на газогидрат до полного его разложения. Время воздействия магнетрона на газогидрат определяется по формуле (3.7):

$$t = \frac{A}{P \cdot \eta}, \quad (3.7)$$

где  $A$  – то же, что в формуле (3.6);

$P$  – мощность магнетрона, Вт;

$\eta$  – КПД магнетрона.

Магнетрон компании ПАО «Тантал» М-136 и его модификации М-136-1, М-136-2 и М-136-3 работают в диапазоне электромагнитных волн 2400-2500 МГц, обладают выходной мощностью 1400 Вт. КПД магнетрона 85% [58]. Магнетрон М-136-2 изображен на рисунке 6.

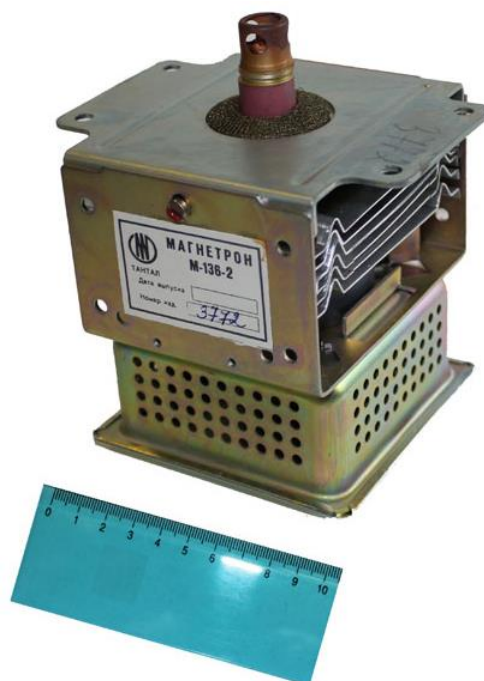


Рисунок 6 – Магнетрон М-136-2 компании ПАО «Тантал»

Для данного прибора время воздействия на газогидратную пробку составит:

$$t = \frac{6482696}{1400 \cdot 0,85} = 5448 \text{ с.}$$

При переводе этого значения в часы и минуты с округлением в большую сторону получаем 1 час и 31 минуту работы.

Рассмотрим высокоомощные магнетроны компании ЗАО «НПП «Магратеп». В качестве рассматриваемых приборов выбраны магнетроны М-168 с мощностью 5 кВт и М-177 с мощностью 75 кВт.

Магнетрон М-168 работает в диапазоне электромагнитных волн от 2400 до 2500 МГц, при этом его выходная мощность составляет 5 кВт. КПД данного магнетрона – 60% [53]. Магнетрон М-168 изображен на рисунке 7.



Рисунок 7 – Магнетрон М-168 компании ЗАО «НПП «Магратеп»

Расчетное время работы составит:

$$t = \frac{6482696}{5000 \cdot 0,6} = 2161 \text{ с.}$$

При переводе этого значения в минуты с округлением в большую сторону получаем 36 минут работы.

Магнетрон М-177 работает в диапазоне электромагнитных волн от 905 до 925 МГц, при этом его выходная мощность составляет 75 кВт. КПД данного магнетрона не менее 85% [54]. Магнетрон М-177 изображен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Магнетрон М-177 компании ЗАО «НПП «Магратеп»

Расчетное время работы составит:

$$t = \frac{6482696}{75000 \cdot 0,85} = 102 \text{ с.}$$

При переводе этого значения в минуты с округлением в большую сторону получаем 2 минуты работы.

Однако главным недостатком представленных магнетронов является их конструктивная особенность, а именно – их размеры. Самым подходящим для использования в насосно-компрессорных трубах является магнетрон М-177 компании ЗАО «НПП «Магратеп», так как он имеет круглое сечение с максимальным диаметром 126 мм. Он свободно проходит через сечение расчетной скважины диаметром 132 мм, однако размеры не позволяют ему находиться в скважине при нормальной ее работе, только во время полного ее закупоривания газогидратом. Размеры магнетрона М-177 представлены на рисунке 9.

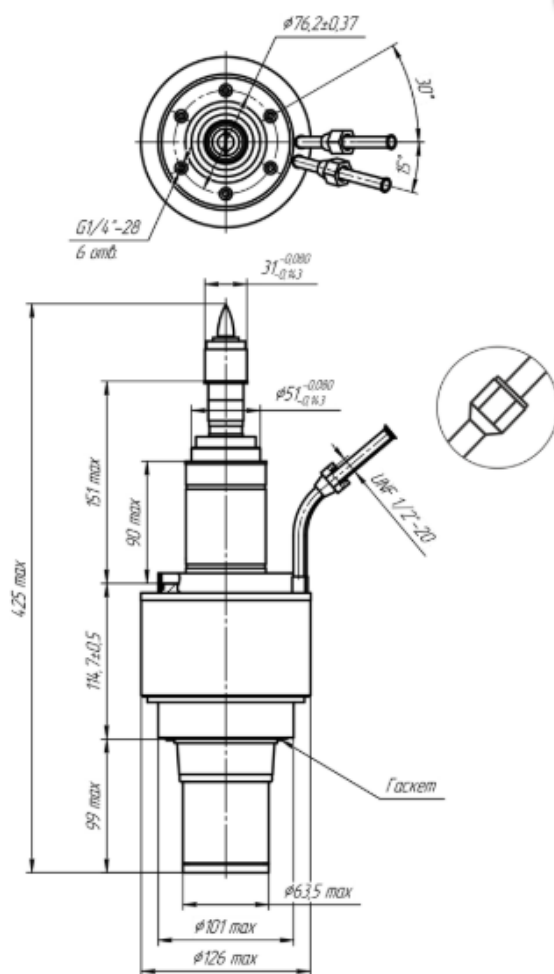


Рисунок 9 – Чертеж магнетрона М-177 компании ЗАО «НПП «Магратеп»

Данный недостаток требует проектирования специализированных магнетронов для использования их в насосно-компрессорных трубах с возможностью их нахождения в скважине при нормальной ее работе.

В качестве примера возможности такого изготовления служат магнетроны с круглой мишенью, изготавливаемые компанией ООО «ИОНТЕК-нано». Компания изготавливает магнетроны с диаметром мишени от 40 до 250 мм [56]. Однако данный тип магнетрона имеет узкоспециализированное назначение – он предназначен для нанесения тонких пленок ферромагнитных металлов или пленок немагнитных материалов способом магнетронного распыления в инертных средах. Данный тип магнетронов для разложения газогидратных пробок не подходит ввиду своих технологических особенностей. Так же стоит отметить высокую стоимость таких магнетронов – несколько миллионов рублей.



## 4 Промышленная безопасность

### 4.1 Нормативные документы в области промышленной безопасности

Эксплуатация постоянных магнитов связана с наличием магнитных полей, генерация же переменных магнитных полей осуществляется с помощью постоянных или переменных токов и связана с наличием электромагнитных полей.

Газовые и нефтяные промыслы являются опасными производственными объектами, эго эксплуатация регламентируется приказом Ростехнадзора «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности» (с изменениями на 12 января 2015 года) (редакция, действующая с 1 января 2017 года) [7].

Эксплуатация электрооборудования, сопровождающаяся электромагнитными излучениями и электромагнитными полями, регламентируется следующими нормативными документами:

- СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [4];
- СанПиН 2.2.4.1329-03 «Требования по защите персонала от воздействия импульсных электромагнитных полей»[3];
- СанПиН 2.2.4.0-95 «Гигиенические требования при работе в условиях воздействия постоянных магнитных полей» [2];
- СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190-03 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи» [1];
- ГОСТ 12.1.002-84 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах [9];
- ГОСТ 12.1.006-84 Система стандартов безопасности труба (ССБТ). Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля (с Изменением N 1) [10];

- ГОСТ 12.1.045-84 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля [13];

- ГОСТ 12.1.009-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения [11];

- ГОСТ 12.1.019-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [12];

- Приказ Минтруда России № 328н «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок (с изменениями на 15 ноября 2018 года) [5];

- Приказ Минэнерго России № 6 «Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей (с изменениями на 13 сентября 2018 года) [6];

- Приказ Главного государственного санитарного врача СССР №2550-82 «Предельно допустимые уровни напряженности электромагнитного поля, создаваемого индукционными бытовыми печами, работающими на частоте 20-22 кГц [8].

На основании вышеперечисленных документов регуляция воздействия магнитных и электромагнитных полей производится на опасных производственных объектах за счет их экранирования материалами, в которых происходит затухание электромагнитных волн. Экранирование производится с помощью экранов, выполненных из листовой стали, с их дальнейшим заземлением.

При эксплуатации магнитного и электромагнитного оборудования внутри насосно-компрессорной колонны в качестве экрана выступает насосно-компрессорная труба и обсадная колонна, дополнительных сооружений не требуется.

## Заключение

В ходе работы были рассмотрены механизмы влияния магнитного и электромагнитного полей на углеводородное сырье, варианты применения полей при добыче, промысловой подготовке, переработке и транспортировке.

Были определены свойства нефти и газа, изменяющиеся под воздействием магнитного поля, а также элементы состава, определяющие изменение свойств сырья при попадании в магнитное поле. На основании полученных данных были рассмотрены проводимые эксперименты с нефтью и газом, заключающиеся в помещении их в магнитные и электромагнитные поля.

Опираясь на данные научных исследований, были рассмотрены перспективы применения магнитных полей в нефтегазовой отрасли на таких этапах производства, как добыча, промысловая подготовка и транспортировка. Применение магнитных и электромагнитных полей по большей части оказалось перспективным при использовании их с уже существующими технологиями, отчетливо это проглядывается в обезвоживании нефти, ее обессоливании, удалении механических примесей. Стоит также отметить, что применение магнитных полей обособленно от других методов позволяет в разы уменьшить асфальтосмолопарафиновые отложения при добыче и транспортировке нефти, а с помощью электромагнитных полей можно достичь более быстрого и экономически выгодного разрушения газогидратных пробок и отложений.

При выполнении расчетной главы было рассчитано количество энергии, необходимой для разрушения газогидратной пробки, образовавшейся в насосно-компрессорной трубе с известными технологическими параметрами. При образовании гидратной пробки длиной 1 метр в насосно-компрессорной трубе с радиусом 66 мм для ее нагрева с температуры 294,9°С до температуры 268,3°С и полного разложения необходимо подвести количество теплоты в размере 6482,696 кДж. В качестве подвода энергии были рассмотрены магнетроны М-136, М-168 и М-177. Из-за различия мощностей данных приборов наблюдается разное время воздействия на газогидратную пробку. При использовании магнетрона М-136 необходима его непрерывающаяся

работа в течение 1 часа 31 минут, при использовании магнетрона М-168 необходимо 36 минут, при использовании магнетрона М-177 – 2 минут. Полученные результаты и геометрическая форма использованных в расчете приборов указывают на необходимость проектирования магнетронов, специализированных для разрушения отложений газогидратов в насосно-компрессорных трубах, с мощностью, дающей наибольшую скорость разложения гидрата, но при этом геометрические размеры устройства должны обеспечивать возможность его нахождения в стволе скважины во время ее эксплуатации.

При изучении промышленной безопасности было выяснено, что магнитное электромагнитное воздействия необходимо экранировать, что достигается путем внедрения защитных экранов, поглощающих магнитные и электромагнитные волны. Экран необходимо заземлять во избежание поражения электрическим током, возникающим в нем вследствие электродвижущей силы при изменении магнитного потока. При помещении источника магнитного или электромагнитного поля в насосно-компрессорные трубы труба и обсадная колонна экранируют воздействие полей на окружающую среду.

Таким образом, можно сказать, что некоторые варианты применения магнитного поля улучшают производственные процессы, при этом не требуя колоссальных экономических затрат, поэтому их внедрение в нефтегазовую отрасль является оправданным и перспективным, а некоторые не приводят к достижению требуемых от них результатов, поэтому их внедрение на производство не является перспективным.

## Список литературы

1. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190-03 Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи / Главный государственный санитарный врач РФ. Минздравмедпром России. – М: Российская газета. – 2003. – №85. – 5 с.
2. СанПиН 2.2.4.0-95 Гигиенические требования при работе в условиях воздействия постоянных магнитных полей / Главный государственный санитарный врач РФ. – М: Госкомсанэпиднадзор России. – 1996. – 29 с.
3. СанПиН 2.2.4.1329-03 Требования по защите персонала от воздействия импульсных электромагнитных полей / Главный государственный санитарный врач РФ. Минздравмедпром России. – М: Российская газета. – 2003. – №119/1. – 18 с.
4. СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах / Главный государственный санитарный врач РФ. – Официальный интернет-портал правовой информации [www.pravo.gov.ru](http://www.pravo.gov.ru). – 2016. – 72 с.
5. Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок (с изменениями на 15 ноября 2018 года). Приказ Минтруда России от 24.07.2013 № 328н. – 2014. – 45 с.
6. Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей (с изменениями на 13 сентября 2018 года). Приказ Минэнерго России от 13.01.2003 № 6. – М: Российская газета. – 2003. – №139. – 54 с.
7. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности» (с изменениями на 12 января 2015 года) (редакция, действующая с 1 января 2017 года). Приказ Ростехнадзора от 12.03.2013 № 101. – 2013. – 284 с.

8. Предельно допустимые уровни напряженности электромагнитного поля, создаваемого индукционными бытовыми печами, работающими на частоте 20-22 кГц. Приказ Главного государственного санитарного врача СССР от 10.06.1982 №2550-82. – М: Сборник важнейших официальных материалов по санитарным и противозащитным вопросам. – 1994. – №2/1. – 2 с.
9. ГОСТ 12.1.002-84 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. – введ. 05.12.1984. – Официальное издание. М: Стандартинформ. – 2009. – 6 с.
10. ГОСТ 12.1.006-84 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля (с Изменением N 1) . – введ. 29.11.1986. – Официальное издание. Система стандартов безопасности труда. Сб. ГОСТов. – М: ИПК Издательство стандартов. – 2002. – 5 с.
11. ГОСТ 12.1.009-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения. – введ. 07.11.2018. – Официальное издание. М: Стандартинформ. – 2019. – 20 с.
12. ГОСТ 12.1.019-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – введ. 07.11.2018. – Официальное издание. М: Стандартинформ. – 2019. – 16 с.
13. ГОСТ 12.1.045-84 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. – введ. 17.09.1984. – Официальное издание. М: Стандартинформ. – 2006. – 2 с.
14. Пат. 2198849 Российская Федерация, МПК C02F 1/48, C02F 103/34. Устройство для магнитной обработки жидкости / В.И. Бородин, Е.Н. Тарасов, А.В. Зинин, А.Д. Хрущев; заявитель и патентообладатель ООО «НПП» Лантан-1». - № 2001109204/12; заявл. 10.04.2001; опубл. 20.02.2003, Бюл. №5. – 1 с.

15. Пат. 2235690 Российская Федерация, МПК C02F 1/48, C02F 103/34. Устройство для магнитной обработки нефти / В.И. Бородин, А.В. Зинин, Е.Н. Тарасов, А.Д. Хрущев; заявитель и патентообладатель ООО «НПП» Лантан-1». - № 2002128996/15; заявл. 30.10.2002; опубл. 10.09.2004, Бюл. №25. – 1 с.

16. Пат. 2167824 Российская Федерация, МПК C02F 1/48. Магнитный туннель / П.Р. Велес, Н.А. Пивоварова; заявитель и патентообладатель Астраханский государственный университет. - № 98104229/12; заявл. 27.01.2000; опубл. 27.05.2001, Бюл. №15. – 1 с.

17. Асанова А.Р. Улучшение физико-химических свойств нефти месторождения им. Ю. Корчагина с помощью магнитного поля / А.Р. Асанова, Г.В. Власова // Наука сегодня: проблемы и перспективы развития. – 2018. – с. 9-10.

18. Антониади Д.Г. Анализ существующих методов борьбы с асфальтосмолопарафиновыми отложениями (АСПО) при добыче нефти / Д.Г. Антониади, Н.А. Шостак, О.В. Савенок, Д.М. Михайлович // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2011. - №9. – С. 32-37.

19. Бешевли Б.И. Применение электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона для борьбы с гидратообразованием / Б.И. Бешевли, В.Ф. Иващенко, А.П. Касьян, Г.А. Коваленко // Газовая промышленность. – 1975. - №2. – С. 21-22.

20. Бородин В.И. Магнетизм нефти и омагничивание ее для уменьшения асфальтосмолопарафиновых отложений / В.И. Бородин, А.Д. Хрущев, А.В. Зинин, Е.Н. Тарасов // Химическая физика и мезоскопия. – 2005. – Т. 7, №2. – С. 169-180.

21. Борсуцкий З.Р. Магнитообработка флюидов в основе энергосберегающей технологии / З.Р. Борсуцкий, С.Е. Ильясов, П.М. Южанинов, И.П. Солдатова // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2002. - №8. – С. 96-100.

22. Булейко В.М. Экспериментальное исследование термодинамических свойств газовых гидратов в пористых средах при



термобарических условиях, соответствующих жидкому состоянию углеводородных гидратообразующих компонентов / В.М. Булейко, Г.А. Вовчук, Е.Б. Григорьев, А.П. Федосеев // Вести газовой науки. – 2013. – С. 224-234.

23. Бушковский А.Л. Опыт применения магнитной обработки перекачиваемых жидкостей в НГДУ Стрежевойнефть ОАО «Томскнефть» ВНК / А.Л. Бушковский, О.В. Гаврилюк, Л.В. Прасс, В.А. Кольцов, М.М. Азаренко // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2000. - №5. – С. 51-54.

24. Вартумян Г.Т. Оценка эффективности применения методов борьбы с асфальтосмолопарафиновыми отложениями в ООО «РН-Краснодарнефтегаз» / Г.Т. Вартумян, Г.Д. Калустов, Ю.Г. Стрельцова, Г.В. Кусов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. - №2. – С. 43-45.

25. Верховых А.А. Исследование магнитного поля в процессе обессоливания нефти / А.А. Верховых, Т. Адемувагун, Н.С. Гараева, А.А. Елпидинский // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20, №4. – С. 24-26.

26. Истомин В.А. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах добычи газа / В.А. Истомин, В.Г. Квон // М.: ООО «ИРЦГазпром». – 2004. – С. 433.

27. Кириллова Л.Б. Разработка новых методов первичной подготовки углеводородного сырья / Л.Б. Кириллова, Н.А. Пивоварова, Г.В. Власова, А.П. Миляев, Р.Г. Радюков // Научные исследования и инновации. – 2011. – Т. 5, №1. – С. 96-98.

28. Маймакова А.А. Исследование влияния магнитного поля в сочетании с деэмульгатором на процессы обезвоживания нефти АО «Эмбаунайгаз» / А.А. Маймакова, Т.А. Омарова, А.Б. Ауезов, Д.М. Туркменова, А.Д. Шейх-али // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2015. - №11-1. – С. 106-108.

29. Мурсалов Е.Г. Аналитическое исследование воздействия переменного электромагнитного поля на процесс коагуляции воды в

водоуглеводородных эмульсиях / Е.Г. Мурсалов // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2009. - №1(48). – С. 51-55.

30. Мурсалов Е.Г. Совершенствование метода магнитной обработки водоуглеводородных дисперсных смесей в промышленных деэмульсаторах / Е.Г. Мурсалов // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2007. - №6(41). – С. 49-53.

31. Омарова Т.А. Влияние магнитного поля на вязкость Западно-Казахстанской нефтесмеси / Т.А. Омарова, А.Б. Ауезов, Е.С. Махмотов, А.И. Ниязюаева, А.Д. Шейх-али // Апробация. – 2015. - №5(32). – С. 9-12.

32. Пивоварова Н.А. Новые пути интенсификации процессов нефте- и газоперерабатывающей отрасли / Н.А. Пивоварова, Б.И. Белинский // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2005. - №6(29). – С. 82-88.

33. Сергеев А.А. Применение магнитного поля в процессах разрушения водонефтяной эмульсии / А.А. Сергеев // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2016. - №1. – С. 319-323.

34. Такаева М.А. Особенности обессоливания парафинистой нефти часть 1. Возможности волнового воздействия и активирующих добавок при обессоливании нефти / М.А. Такаева, Н.А. Пивоварова, Л.Б. Кириллова, Г.В. Власова, В.Д. Щугорев // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2009. - №6. – С. 86-88.

35. Такаева М.А. Особенности обессоливания парафинистой нефти часть 2. Возможности волнового воздействия и активирующих добавок при обессоливании нефти / М.А. Такаева, Н.А. Пивоварова, Л.Б. Кириллова, Г.В. Власова, В.Д. Щугорев // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2010. - №1. – С. 92-95.

36. Тебенихин Е.Ф. Обработка воды для теплоэнергетического устройства железнодорожного транспорта / Е.Ф. Тебенихин, Л.А. Горянов // М.: Транспорт. – 1986. – С. 159.

37. Тебенихин Е.Ф. Обработка воды магнитным полем в теплоэнергетике / Е.Ф. Тебенихин // М.: Энергия. – 1970. – С. 144.
38. Уразов Р.Р. Динамика накопления газогидратных отложений в действующих газопроводах. Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа / Р.Р. Уразов // Уфа. – 2005. – С. 135-137.
39. Ушаков А.В. Перспективы применения магнитной обработки пластового флюида с целью управления эффективностью работы погружных электроцентробежных насосов при эксплуатации в осложненных условиях / А.В. Ушаков // Территория нефтегаз. – 2015. - №8. – С. 44-50.
40. Фатыхов М.А. Разработка методики определения и экспериментальные исследования диэлектрических параметров газового гидрата в области высоких частот / М.А. Фатыхов, Н.Я. Багаутдинов // Уфа: Нефтегазовое дело. – 2006. – С. 3-7.
41. Шайдаков В.В. Магнитная обработка газового потока для удаления механических примесей / В.В. Шайдаков, Е.В. Шайдаков, А.С. Тотанов // Экспозиция нефть газ. – 2014. - №4(36). – С. 20-24.
42. Якуцени В.П. Газогидраты – нетрадиционное газовое сырье, их образование, свойства, распространение и геологические ресурсы / В.П. Якуцени // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2013. – Т. 8, №4. – С. 1-24.
43. Интернет журнал «Sovetexpert.RU» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://sovetexpert.ru/moshhnost-mikrovolnovki.html> (дата обращения: 01. 06. 2019 г.).
44. Информационный портал «Neftegaz.RU» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/141748-gaz-prirodnyu/> (дата обращения: 01. 06. 2019 г.).
45. Информационный портал «NeftOk» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://neftok.ru/raznoe/kachestvo-nefti.html> (дата обращения: 01. 06. 2019 г.).

46. Образовательный ресурс «Students-library» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://students-library.com/library/read/84333-emulsii-klassifikacia-emulsij-i-metody-ih-polucenia/> (дата обращения: 01. 06. 2019 г.).
47. Образовательный ресурс «StudFiles» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/3611131/page:3/> (дата обращения: 01. 06. 2019 г.).
48. Образовательный ресурс «Библиотечно-музейный комплекс ТЮМГУ» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.tmnlib.ru/jirbis/files/upload/books/VKR/2017/FTI/Protopopova\\_VKR.pdf](http://www.tmnlib.ru/jirbis/files/upload/books/VKR/2017/FTI/Protopopova_VKR.pdf) (дата обращения: 01. 06. 2019 г.).
49. Образовательный ресурс «Все о нефти» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://vseonefti.ru/neft/> (дата обращения: 01. 06. 2019 г.).
50. Образовательный ресурс «Все о нефти» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://vseonefti.ru/etc/prirodnyj-gaz.html> (дата обращения: 01. 06. 2019 г.).
51. Образовательный ресурс «Сверхзадача» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://sverh-zadacha.ucoz.ru/lessons/Contents/td/td/Q.html> (дата обращения: 01. 06. 2019 г.).
52. Образовательный ресурс «Справочник химика 21» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://chem21.info/article/384388/> (дата обращения: 01. 06. 2019 г.).
53. Официальный сайт компании ЗАО «Тантал» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://xn--80aaij5awer.xn--p1ai/production/m168-5kvt/> (дата обращения: 01. 06. 2019 г.).
54. Официальный сайт компании ЗАО «Тантал» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://xn--80aaij5awer.xn--p1ai/production/m177-75kvt/> (дата обращения: 01. 06. 2019 г.).
55. Официальный сайт компании МПК Техпром ВМП [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://mpk-vnp.com/neft/obrazovanie-aspo-i-parafinov.html> (дата обращения: 01. 06. 2019 г.).

56. Официальный сайт компании ООО «ИОНТЕК-нано» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://iontec.ru/produkcija/vakuumnoe-technologicheskoe-ionno-plazmennoe-oborudovanie/magnetronnye-raspylitelnye-ustrojstva/magnetrony-s-krugloj-mishenyu-diametr-40-250-mm/> (дата обращения: 01.06.2019 г.).

57. Официальный сайт компании ООО «Роспайп» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://ros-pipe.ru/tekh\\_info/tekhnicheskie-stati/khranenie-i-transportirovka-nefteproduktov/vyazkost-nefti-nefteproduktov/](http://ros-pipe.ru/tekh_info/tekhnicheskie-stati/khranenie-i-transportirovka-nefteproduktov/vyazkost-nefti-nefteproduktov/) (дата обращения: 01.06.2019 г.).

58. Официальный сайт компании ПАО «НПП «Тантал» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.oao-tantal.ru/tovar.php?id=3769> (дата обращения: 01.06.2019 г.).

59. Электронный справочник «ThermalInfo.ru» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/metally-i-splavy/teploemkost-stali> (дата обращения: 01.06.2019 г.).





МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДФУ)

**Инженерная школа**

Кафедра нефтегазового дела и нефтехимии

**ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ ВКР**

на выпускную квалификационную работу студента  
Разумова Ильи Константиновича

Направление подготовки 21.03.01 Нефтегазовое дело  
группа Б3403а

Руководитель ВКР Гульков Александр Нефедович, д.т.н., профессор

На тему «Влияние магнитного поля на углеводороды и возможности его применения в нефтегазовой отрасли»

Дата защиты ВКР « 1 » июля 2019 г.

ВКР содержит актуальные вопросы об усовершенствовании существующих методов, применяемых при добыче, промысловой подготовке и транспортировке нефти и газа.

Практическая значимость заключается в разработке и рассмотрении технологии разложения газогидратной пробки в насосно-компрессорной трубе путем ввода в нее источника электромагнитного излучения. Представленные теоретические исследования, основанные на результатах найденных экспериментов, доказывают возможность и обоснованность применения данного способа разрушения газогидрата.

В ходе выполнения работы Разумов И.К. показал навыки работы с литературой и способности проводить патентный поиск. Студент отличился ответственностью, целеустремленностью, умением грамотно и последовательно излагать свои мысли. При выполнении работы студент проявил заинтересованность и самостоятельность.

Работа выполнена в соответствии с заданием и требованиями к ВКР. Результатом исследования является публикация статьи, которая была апробирована на международной конференции МК-26-19.

Уникальность работы составляет 84%.

По мнению руководителя, Разумов И.К. достоин присвоения квалификации бакалавр по направлению 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

На основании вышеизложенного работа заслуживает оценку «отлично».

Руководитель ВКР д.т.н., профессор  
(ученая степень, уч. звание)

(подпись)

А.Н. Гульков  
(и. о. фамилия)

« 26 » июня 2019 г.