

УХТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности»

На правах рукописи



Лютеев Александр Анатольевич

**ВЫСОКОГРАДИЕНТНЫЙ МАГНИТНЫЙ СЕПАРАТОР ДЛЯ ОЧИСТКИ
ПЛАСТОВЫХ ВОД ОТ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НАНОДИСПЕРСНОГО МАГНЕТИТА**

Специальность

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Быков Игорь Юрьевич

Ухта 2020

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
1. АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПЛАСТОВЫХ ВОД ОТ НЕФТИ МАГНИТНЫМИ СОРБЕНТАМИ	14
1.1 Обзор существующих типов магнитных сепараторов для удаления нефтепродуктов магнитными сорбентами	14
1.1.1 Анализ пластовых водных систем и методов очистки от нефти	14
1.1.2 Принцип работы магнитных сепараторов	23
1.1.3 Существующие типы магнитных сепараторов для очистки нефтезагрязненных жидких сред.....	23
1.2 Существующие методы оценки эффективности очистки вод от нефтепродуктов с применением магнитных сепараторов	35
1.2.1 Нормы предельно допустимых концентраций нефтепродуктов в пластовых водах	35
1.2.2 Методы оценки эффективности применения магнитного сепаратора.....	36
1.3 Анализ методов моделирования режима работы магнитного сепаратора.....	41
1.4 Пути совершенствования конструкции магнитного сепаратора при доочистке пластовых вод от эмульгированных нефтепродуктов	45
1.5 Цели и задачи исследований	47
Выводы по главе.....	48
2. КОМПЛЕКС МЕТОДИК ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	50
2.1 Методика отбора и хранения проб воды.	50
2.2 Определение концентрации нефти в воде	51
2.3 Методика определения магнитной индукции и градиента магнитного поля в магнитных устройствах	52
2.4 Методика получения магнитных частиц магнетита и изучение его характеристик	62
2.4.1 Способы получения магнитных частиц.....	62
2.4.2 Методика определения размеров магнитных частиц.....	66
2.4.3 Определение концентрации магнетита в составе жидкости	74
2.5 Методика оценки эффективности работы магнитного сепаратора	76
Выводы по главе.....	78

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОГО МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОДИСПЕРСНОГО МАГНЕТИТА	80
3.1 Влияние параметров системы на режим работы магнитного сепаратора.....	80
3.1.1 Зависимость между магнитными свойствами частиц ферромагнетиков и их размерами	80
3.1.2 Моделирование процессов в коллоидной системе магнитных частиц	88
3.1.2.1 Силы на магнитной частице	88
3.1.2.2 Седиментационная устойчивость частиц магнетита в воде.....	90
3.1.2.3 Агрегативная устойчивость магнитного коллоида в жидкой среде..	92
3.1.3 Моделирование извлечения капли нефти	96
3.1.3.1 Моделирование движения омагниченной нефти в неоднородном магнитном поле	96
3.1.3.2 Моделирование экстракции капли нефтяных эмульсий с помощью нанодисперсных магнитных частиц и силового воздействия неоднородного магнитного поля.....	101
3.2 Выбор оптимальных параметров магнитного сепаратора для экстракции омагниченной глобулы нефти	107
Выводы по главе.....	119
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОГО МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ПЛАСТОВОЙ ВОДЫ ОТ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЙ	121
4.1 Разработка лабораторного стенда для проведения экспериментальных исследований	121
4.2 Подготовка магнитных частиц	126
4.3 Результаты лабораторных экспериментов по очистке пластовых вод.....	130
4.4 Оценка эффективности способа очистки по эффективности.....	137
Выводы по главе.....	144
5. МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОГО МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОДИСПЕРСНОГО МАГНЕТИТА	146
5.1 Выбор оптимальных параметров магнитного сепаратора.....	146
5.2 Высокоградиентный магнитный сепаратор с ферромагнитным картриджем	155

5.3 Методика расчета производительности магнитного сепаратора с продольным расположением стержней относительно потока.....	157
5.4 Кассетно – патронный высокоградиентный магнитный сепаратор	161
5.5 Принципиальная конструкция установки для очистки.....	166
Выводы по главе.....	170
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	171
Литература:	173
Приложение 1.	187
Приложение 2.	188
Приложение 3.	194
Приложение 4.	205
Приложение 5.	206

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

При нефтедобыче пластовые воды, отделяемые от нефти в процессе ее сбора и подготовки, называются подтоварными, закачиваются в пласты для поддержания пластового давления. Присутствие в закачиваемой воде эмульсионных капель нефти и механических примесей приводит к снижению приемистости пористой среды коллектора. Поэтому перед закачкой подтоварных вод в пласты требуется их глубокая очистка. Нормы **качества пластовой воды**, закачиваемой в продуктивные пласты, регламентируются отраслевым стандартом ОСТ 39-225-88. Требования к содержанию количества нефтепродуктов в пластовой воде определяются проницаемостью коллектора и для некоторых видов достигают значений менее 5 мг/дм³.

Среди современных методов очистки воды от нефтепродуктов можно выделить: механические, физико-химические, химические и биологические. Механические методы (центрифугирование, отстаивание, фильтрование) позволяют извлечь в основном крупнодисперсную фракцию загрязнителя. Химические и физико-химические методы очистки более эффективны, но требуют использования дополнительных химических реагентов, которые, в свою очередь, также могут выступать загрязнителями. Наиболее экологичные методы - биологические - лишены всех перечисленных выше недостатков, но применение бактериальной очистки требует продолжительного времени и соответствующих температурных условий, благоприятных для деятельности микроорганизмов-деструкторов. Перспективным является метод физико-химической очистки вод от нефтепродуктов методом омагничивания извлекаемых частиц нефти магнитным сорбентом и дальнейшего извлечения с помощью магнитного поля. Для извлечения омагниченной нефти применяются магнитные сепараторы в различных модификациях. Однако этот метод применяют в основном при разливах нефти на поверхности воды. В настоящей работе предлагается использовать нанодисперсные магнитные сорбенты по новому назначению для очистки пластовых вод от эмульгированных нефтепродуктов с применением

высокоградиентного магнитного сепаратора, способного экстрагировать частицу со слабой магнитной восприимчивостью.

Таким образом, тема исследований в области разработки эффективного оборудования для очистки эмульгированных вод от нефтепродуктов является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Существенный вклад в изучении и проектировании кассетно-патронных магнитных сепараторов внесли Булыжёв Е. М., Булыжёв Э. Е. Афанасьев Е. П., Меньшов Е. Н., Кондратьева Н. Н. Такие устройства используются для разделения жидкостей и сыпучих материалов от ферромагнитных частиц. Наиболее часто применяемая конструкция для разделения жидкости от ферромагнитных частиц – это магниты, представленные в виде системы разнообразных выдвижных решеток.

Еще один популярный вид магнитного сепаратора – это роторный или барабанный. Ганзбург Л. Б., Лысов А. А., Стопский В. С. предложили несколько вариантов роторных электромагнитных сепараторов для очистки жидкостей от мелких ферромагнитных частиц. В предлагаемых аппаратурных решениях извлечение мелкодисперсных частиц достигается за счет высокой индукции и градиента магнитного поля. Используют в таких устройствах систему сильных редкоземельных постоянных магнитов NdFeB. Такого принципа сепараторы используют преимущество для разделения сухой смеси.

Каждый такой сепаратор предназначен для определенных условий эксплуатации и ферромагнитных частиц с магнитным моментом не меньше установленного значения в паспорте устройства. С целью повышения эффективности удаления ферромагнитных частиц из немагнитной среды наиболее традиционным путем является увеличение градиента и индукции магнитного поля. При этом говорить о применимости рассмотренных устройств для извлечения омагниченной эмульсий с маленьким магнитным моментом не представляется возможным из-за того, что в исследованиях не представлены конструктивные особенности, связанные с расстоянием извлечения, расчеты сил

действующих на ферромагнетик, численная оценка градиента индукции магнитного поля в рабочей зоне. Кроме того устройство должно быть приспособлено к условиям эксплуатации. Таким образом, без полноценных представлений об условиях взаимодействия магнитного поля с эмульгированными частицами нефти, омагниченными нанодисперсными ферромагнитными частицами, нельзя сделать вывод о возможности применения тех или иных магнитных сепараторов для очистки воды от нефтезагрязнений. При использовании высокодисперсного магнетита уменьшается объемная доля ферромагнитного материала на поверхности эмульсионной капли. Поэтому необходимо разработать магнитный сепаратор, справляющийся с такой задачей.

Идея исследования

Использование активной поверхностной энергии нанодисперсных магнитных частиц для поверхностного омагничивания глобул нефти и управление их движением в высокоградиентном магнитном поле.

Цель работы

Разработка высокоградиентного магнитного сепаратора для очистки пластовой воды от нефтяных примесей с использованием дозированной концентрации нанодисперсного магнетита.

Задачи исследования

1. Анализ существующих конструктивных особенностей жидкостных магнитных сепараторов для сбора нефтепродуктов магнитными сорбентами.
2. Формирование комплекса методик для проведения исследований.
3. Моделирование магнитного сепаратора с постоянной высокоэнергетичной магнитной системой при магнитной сепарации эмульгированных частиц нефти с применением нанодисперсного магнетита.
4. Экспериментальные исследования эффективности высокоградиентного магнитного сепаратора для очистки пластовой воды от нефтезагрязнений.

5. Методика обоснования конструкции и режимов работы высокоградиентного магнитного сепаратора с использованием нанодисперсного магнетита.

Научная новизна результатов работы

1. Получена аналитическая зависимость для теоретической оценки оптимальной концентрации C_{opt} нанодисперсного магнетита в виде учетверенного произведения параметра, характеризующего величину концентраций $C_{неф}$ нефти в пластовой воде, на размер магнитных частиц $d_{м.ч}$, диаметр глобул нефти $d_{эм.к}$ и их относительную плотность $\rho_{маг} / \rho_{неф}$.

2. Установлено, что скорость извлечения омагниченных глобул нефти из нефтезагрязненных пластовых вод прямо пропорциональна 0,22-м долям массового содержания наночастиц магнетита в сферической глобуле нефти, коэффициенту упаковки магнетита k на поверхности глобулы, градиенту магнитного поля, величине магнитной насыщенности магнетита $M_{нас}$ с учетом Ланжевенова влияния и обратно пропорциональна вязкости очищаемой среды.

3. Получена оценка градиента магнитного поля картриджа или кассеты магнитного сепаратора с продольным расположением стержней магнитной системы, равная усредненному линейному градиенту магнитного поля в окрестностях трех точек контакта диагональных и соседних стержней в ромбовидной рабочей области.

4. Получено выражение для оценки производительности высокоградиентного магнитного сепаратора рабочей площадью в поперечнике S_r и кассетой или картриджем с продольным расположением стержней длиной L относительно потока, имеющее вид:
$$Q = \frac{4S_r L k d_{эм} d_{ч} M_{нас} L(z_{ч})}{9\eta d} \left| \frac{dB}{dx} \right|.$$

Теоретическая значимость работы.

Обосновано продольное расположение стержней в высокоградиентном магнитном сепараторе относительно жидкостного потока. Создана методика проектирования картриджа и кассеты магнитного сепаратора, предложены аналитические выражения для оценки оптимальной концентрации

нанодисперсного магнетита в пластовой воде и производительности неодимового магнитного сепаратора. Созданы модели и алгоритмы, на основе которых описана методика режима работы магнитного сепаратора.

Практическая значимость работы

Разработан «Способ очистки воды от эмульгированных нефтепродуктов» (Регистрационный номер заявки на изобретение 2016119643/05(030970) от 20.05.2016), который предназначен для очистки пластовой воды от тонкодисперсной эмульсии с применением коллоидного магнетита с размером частиц 10 нм.

Подана заявка на патент «Высокоградиентный неодимовый магнитный сепаратор с ферромагнитным картриджем» (Регистрационный номер заявки на изобретение 2018143171 Входящий номер 071972 от 5.12.2018), который совместно с нанодисперсным магнетитом используется для доочистки пластовой воды от эмульгированных нефтепродуктов.

Разработана методика управления режимом работы магнитного сепаратора МНС-1 для извлечения из воды эмульгированных нефтепродуктов с применением нанодисперсного магнетита и принята к использованию в научно проектном институте ООО «НИПИ нефти и газа УГТУ»

Материалы диссертационной работы изложены в практикуме «Расчет конструкции магнитных устройств», включающий в себя различные методы решения полевых задач по магнитостатике, а также приведена методика по проектированию и расчету режима работы магнитного устройства. Используется в учебном процессе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ухтинский государственный технический университет» при подготовке бакалавров по направлению 15.02.03 и магистров по направлению 15.04.02 "Технологические машины и оборудование".

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль) в части пунктов:

1. Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов; механизации производства в соответствии с современными требованиями внутреннего и внешнего рынка, технологии, качества, надежности, долговечности, промышленной и экологической безопасности.

2. Теоретические и экспериментальные исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач применялись методы системного анализа. На первом этапе проводился процесс анализа и синтеза объекта исследования, на основе которой была выполнена декомпозиция с выделением основных параметров управления процессом очистки. На следующем этапе для решения задач использовались процедуры моделирования и эксперимента. Для описания основных свойств объекта исследования применялось математическое моделирование, при котором процессы были описаны аналитическими выражениями. Для реализации аналитических выражений использовались такие программные продукты, как Matcad, Matlab. Кроме того, для численной оценки и решения задач конструирования элементов магнитного сепаратора использовалось компьютерное моделирование в программе инженерного анализа и двумерного моделирования Elcut. Экспериментальное исследование проводилось для проверки адекватности составленных моделей и для решения некоторых задач. При этом использовались методы планирования эксперимента, аналитические и статистические методы обработки данных, вероятностные методы.

Положения, выносимые на защиту

1. Выполненный комплекс моделирования режимов работы высокоградиентного магнитного сепаратора с применением нанодисперсного магнетита, позволяющий выбрать оптимальные значения параметров эффективности очистки пластовых вод от эмульгированных нефтепродуктов.

2. Разработанный метод определения оптимальной концентрации нанодисперсного магнетита, основанный на сведениях о его размерах, составе пластовой воды и первичных испытаниях, позволяющий установить необходимую концентрацию магнетита для обработки пластовых вод.

3. Комплекс математических моделей, дающий возможность определить оптимальный диаметр и геометрию расположение стержней в ферромагнитном картридже и магнитной кассете, обосновать скорость потока жидкости в магнитном сепараторе и позволяющий разработать принципиальную схему высокоградиентного магнитного сепаратора.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- XII и XIII Международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех», Ухта: УГТУ, 2011, 2012;

- Научно-технических конференциях преподавателей и сотрудников, Ухта : УГТУ, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015;

- Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области технических наук, Санкт-Петербург, Политехнический университет 2012, 2013;

- Всероссийского конкурса научно исследовательских работ в области информатики и информационных технологий, Белгород, 2011;

- 1, 2, 3 Республиканском молодежном инновационном конвенте «Молодежь – будущему Республики коми», Ухта, 2011, 2012, 2013;

- Республиканском молодежном инновационном форуме «Иноватика: Крохаль 2012», Ухта, 2012;

- Научно-технической конференции «Проблемы разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов», Ухта, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018;

- II Всероссийской научной конференции «Молодежь и наука Севера», Сыктывкар, Коми научный центр УрО РАН, 2013;

- Конкурсе на лучшую научно-техническую разработку молодых специалистов, Ухта, ООО "ЛУКОЙЛ - УНП", 2013;

- Международном семинаре «Рассохинские чтения», Ухта, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019;

- Международном семинаре «Физико-математическое моделирование систем», Воронеж, ВГТУ, 2013, 2014, 2018.

Работа поддержана:

1. Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 г., в рамках реализации мероприятия 1.3.2 «Проведение научных исследований целевыми аспирантами», 2012-2013. «Разработка технологии извлечения примесей из сточных вод с использованием магнитных наночастиц.» Соглашение № 14.132.21.1813

2. Контрактом по программе «УМНИК» (Участник молодежного научно-инновационного конкурса) 2013-2014 «Разработка технологии очистки загрязненных нефтью сточных вод при помощи магнитных наночастиц».

Личный вклад автора

Личный вклад автора в диссертационную работу заключается в проведении расчетно-теоретических исследований с применением математического и компьютерного моделирования для установления режима работы магнитного сепаратора, изготовление стендового неодимового магнитного сепаратора, его расчет для выбора режима работы, проведение физических экспериментов, участие в создании методики разработки и режима работы магнитного сепаратора.

Публикации

Основные результаты исследований опубликованы в 23 работах (11 статей в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК

Минобрнауки России, тезисы научно-технических конференций), 2 заявки на патент на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и изложена на 206 страницах; содержит 93 рисунков, 28 таблиц, 5 приложений и списка использованных источников литературы из 126 наименований, в том числе 23 иностранных.

1. АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПЛАСТОВЫХ ВОД ОТ НЕФТИ МАГНИТНЫМИ СОРБЕНТАМИ

1.1 Обзор существующих типов магнитных сепараторов для удаления нефтепродуктов магнитными сорбентами

1.1.1 Анализ пластовых водных систем и методов очистки от нефти

Для поддержания пластового давления при нефтедобыче применяется в большинстве случаев пластовая вода. Длительная эксплуатация нефтяного месторождения приводит к заводнению пласта, а, следовательно, к значительному количеству попутно добываемой пластовой воды, которая представляет собой водонефтяную эмульсию со значительным содержанием стойких мелкодисперсных нефтяных частиц, трудноудаляемых из эмульсионной системы существующими способами.

Технология очистки нефтесодержащих вод определяется фазовым состоянием и степенью дисперсности эмульсий нефти в воде. Поведение нефтепродуктов в воде обусловлено их меньшей плотностью по сравнению с плотностью воды и чрезвычайно малой растворимостью, которая для тяжелых сортов близка к нулю [82]. Не надо исключать того, что при продолжительном контакте нефти с водой количество нефтепродуктов растворенных в воде, возрастает. При контакте от 2 до 120 часов количество нефти в воде увеличивается от 0,2 до 1,4 мг/л [89].

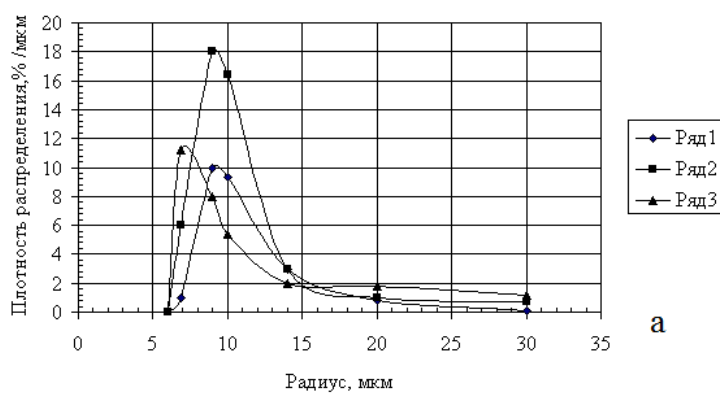
Среди современных методов очистки воды от нефтепродуктов можно выделить механические, физико-химические, химические и биологические.

Среди механических методов наибольшее распространение получило отстаивание, в меньшей мере – фильтрование и центрифугирование [82]. Отстаивание нефтесодержащих сточных вод в нефтеловушках является наиболее старым способом. И в настоящее время в практике используют только метод отстаивания взвешенных частиц [36]. Эффективность извлечения в этих отстойниках зависят от трех сил: гравитационной, архимедовой и Стокса. С

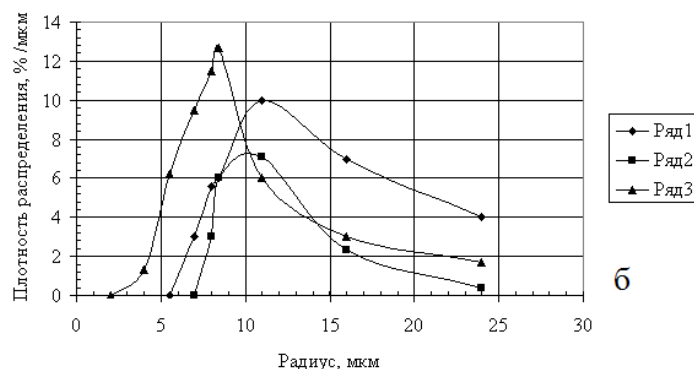
учетом трех сил, скорость всплытия глобул нефти в воде определяется следующей формулой:

$$V_{\text{в}} = \frac{gd^2}{18\eta}(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{н}}), \quad (1.1)$$

где $\eta = 8.9 \cdot 10^{-4}$ Па·с – динамическая вязкость воды, d – диаметр глобулы нефти, $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{н}}$ – плотность воды и нефти соответственно. По паспорту отстойники рассчитан в среднем на скорость всплытия не менее 0,5 мм/с [3]. При этом для тяжелой нефти плотностью 900 кг/м³ такую скорость получают глобулы размерами только около 100 мкм, поэтому часть эмульгированной нефти закачивается обратно в пласт. Наибольшее распространение на практике получили резервуары-отстойники РВС-5000 и РВС-10000. Паспортное время пребывания пластовой воды в резервуарах отстойниках составляет 8 час (при принятом размере капель нефти 80 мкм) [82]. На рисунке 1.1 представлен анализ экспериментальных данных Возейского месторождения о размерах частиц нефти в воде на входе и выходе отстойников РВС-5000 [36].



Исходное содержание нефти: 1 – 108; 2 – 750; 3 – 4000 мг/л



Исходное содержание нефти: 1 – 1400; 2 – 3100; 3 – 176 мг/л

Рисунок 1.1 – Плотность распределения частиц нефти: а – на входе РВС-5000; б – на выходе из РВС-5000

Глобулы нефти после отстаивания с радиусом от 5 до 25 мкм остаются в жидкости. Причем средний радиус частиц нефти составляет 8-12 мкм. Это происходит из-за того, что высокодисперсные частицы подвержены тепловому воздействию, следовательно, не могут быть извлечены такими устройствами. К тому же асфальтеновая оболочка препятствует укрупнению эмульгированной нефти, что приводит к неэффективности использования метода отстоя. Существуют другие виды отстойников: динамические, тонкослойные, трубчатые, пластинчатые [82]. Основная их задача заключается в подготовке воды к физико-химической и биологической очисткам.

Среди физико-химических методов очистки выделяют флотацию, коагуляцию и сорбцию. Флотация характеризуется сложным физико-химическим процессом, при котором дисперсные в воде частицы извлекаются с помощью пузырьков воздуха. Так как частицы газа являются гидрофобными веществами, в жидкости они могут взаимодействовать только с гидрофобными поверхностями [82]. Чем выше гидрофобность примесей загрязненных вод, тем выше вероятность того, что частица прилипнет к пузырьку воздуха. Гидрофильные поверхности веществ с пузырьками газа не взаимодействуют [27].

При коагуляции происходит укрупнение тонкодисперсных частиц в результате их взаимодействия и объединения в агрегаты. Реагентами-коагулянтами в процессе служат разнообразные соли железа и алюминия. Таким образом, на глобулы эмульсии оседают находящиеся в воде ионы одного знака, что приводит к снижению свободной поверхностной энергии частиц. При этом ионы на поверхности образуют адсорбционный слой, что приводит к взаимному слипанию под действием сил молекулярного притяжения, образуя хлопья, которые выпадают в осадок.

Для глубокой очистки от нефтепродуктов используется также метод сорбции. Эффективность сорбентов определяется несколькими параметрами. Во-первых, высокой сорбционной емкостью по отношению к нефти. Во-вторых, степенью гидрофобности, способностью несмачиваемости поверхности. В-третьих, плавучестью после сорбции нефти, а так же возможностью

восстановления или утилизации сорбента [4]. В качестве сорбентов применяют различные пористые материалы: золу, торф, силикагели, активные глины, активированные угли. Наиболее эффективными являются активированные угли. Сорбционная способность активированных углей определяется их микропористой структурой (0,004 – 0,1 мкм), макропоры (0,1 – 2 мкм) и переходные поры, как правило, выполняют функцию транспортных каналов. При этом адсорбция может осуществляться в статических и динамических условиях. Динамическая активность оказывается всегда меньше статической (от 45 до 90 %), так как она ограничена временем протекания сорбируемого вещества в фильтрате [82]. Сейчас в мире производится или используется для ликвидации разливов нефти около двухсот различных сорбентов, которые подразделяют на неорганические, природные органические и органоминеральные, а также синтетические [4].

Химический метод очистки воды от нефтепродуктов предполагает использование веществ, которые при контакте с нефтепродуктами вступают с ним в реакцию с последующим осаждением нерастворимых осадков. При этом в дальнейшем требуется дополнительные методы очистки для извлечения этого осадка и утилизации.

Выбор того или иного способа очистки главным образом зависит от степени дисперсности и стабильности эмульсий.

Весьма популярным среди научных исследований является физико-химический метод очистки воды от нефти с применением ферромагнитных сорбентов. Возможности такого подхода отражены в работах [56, 59, 60, 62, 66, 67, 71, 72]. Одной из эффективных сторон применения ферромагнитных сорбентов является возможность захвата и экстракции загрязнений под действием магнитной силы.

В работе [67] предложено использовать ферромагнитный порошок феррита бария или гидрофобизированного феррита бария. При этом ферромагнитный порошок после контакта с очищаемой водой подвергают обработке переменным электромагнитным полем, которое осуществляется соленоидом в диапазоне

частот от 10 до 1000 Гц при напряженности около 100 кА/м, после чего разделяют порошок от очищенной воды.

В работе [71] в качестве порошкового магнитного сорбента используются оксид железа и диоксид кремния. При этом поверхность порошкового сорбента гидрофобизирована аминами. Сорбент может применяться для сбора нефтепродуктов с поверхности водоема с использованием магнитных приспособлений.

Для очистки воды от эмульгированной нефти [57] предложено использовать в качестве адсорбента гранулы и порошка с диаметром частиц не более 100 мкм прокаленного гальваношлама, в котором основную часть занимает γ -оксид железа. При этом порошок имеет функцию не только сорбента, но и деэмульгатора. Порошок смешивают с постоянными магнитами сферической формы размерами 8 – 10 мм. Полученная смесь является адсорбционным комплексом, через который пропускают загрязненную воду. Ранее в работе [51] был описан похожий подход по очистке сточных вод от нефти, масел и других органических примесей. В воду, загрязненную органическими примесями, добавляют сухой магнетитовый концентрат с размером частиц 50 – 70 мкм в количестве 65-70% масс. Полученную суспензию пропускают через намагничивающее устройство, где отделяют магнетитовый концентрат, загрязненный нефтепродуктами и направляют на аглофабрики металлургических заводов. Сгорающие при этом нефтепродукты экономят энергию, которая расходуется на аглопроцесс.

В работе [56] предложено использовать в качестве сорбента частицы размерами 15-500 нм, содержащих компоненты, мас. %: ферромагнетики 60 -80, углерод 8,8 - 38,8; водород 0,2 - 1,2. Порошок получают плазмохимическим способом. Рассеивание ферромагнитного материала происходит в плазменной дуге. Во время такого процесса подается углерод в зону подачи ферромагнетитка. Введение углеводорода обеспечивает гидрофобность получаемого порошка. Для равномерного распределения порошка по поверхности нефтепродуктов, находящихся не только в виде пленки, но и эмульсии, частицы вводили с потоком

воды. При этом низкое содержание сорбента в извлеченной нефти позволял получать бензиновые и другие фракции.

Авторы в работе [60] описывают получение магнитного сорбента по известной методике осаждения магнетита из растворов солей Fe^{2+} и Fe^{3+} . Полученные частицы размерами 0,01 – 1 мкм обрабатывают в органическом растворителе гамма-аминопропилтриэтоксисиланом при массовом отношении магнетит / γ -аминопропилтриэтоксисиланом = 75/1, в ином случае 50/1. Общее количество метильных и этильных радикалов составляет 0,01 - 0,1 моль на 100 г магнетита. Затем полученную суспензию обрабатывают водной эмульсией этилгидридсилоксановой или метилгидридсилоксановой жидкости. Полученную смесь сушат при температуре 150° до остаточной влажности не более 5 %. При этом удельная поверхность сорбента составляет 20 – 150 м²/г. Эффективность очистки воды от нефтепродуктов с применением этого сорбента составляет 90 - 99 %.

Своеобразный подход к магнитной обработке воды описан в работе [72]. Тонкодисперсный магнетит распыляют по поверхности. После этого всю массу прокачивают через намагничивающее устройство, которое состоит из магнитных пластин с антифрикционным покрытием, снижающим силу адгезии между частицами и поверхностью пластинки. Ферромагнитные частицы, покрытые нефтепродуктами, намагничиваются в этом магнитном поле. Далее смесь направляется в турбулизатор, где происходит коагуляция частиц и образование крупных агрегатов за счет остаточной намагниченности. После чего агломераты отделяются от воды осаждением или фильтрованием. Эффект очистки воды с использованием этого устройства автор оценивает на 98 %.

Для увеличения гидрофобности и сорбционной способности в работе [66] водопоглощающие мелкодисперсные частицы обрабатываются кремнийорганической жидкостью из группы гидридсилоксановых жидкостей в неполярных растворителях, водные эмульсии гидридсилоксановых жидкостей, водные растворы силиконатов щелочных металлов. Изготавливают в реакторе с кремнийорганической жидкостью при температуре $25-50^{\circ}$ путем перемешивания в

режиме турбулентности в течение 15-60 мин. Далее высушивают ее в течение 3-4 часов при температуре 150° . Количество силоксановых групп на поверхности мелкодисперсных частиц составляет 0,1-0,3 моль на 100 г сорбента. Авторы заявляют, что водопоглощение уменьшается от 2 до 6 раз.

В работе [59] описывают получение еще одного пористого магнитного сорбента для удаления нефтепродуктов с поверхности воды и почвы. Сорбент представляет порошок, состоящий из частиц из ферромагнитнетиков с размером частиц 0,001 – 10 мкм и из алюмосиликатного пористого наполнителя с размерами частиц меньше 100 мкм, который обработан кремнийорганической жидкостью в количестве 0,05-0,5 мас. %. Сорбент получают при следующем отношении компонентов: гидрофобное полимерное связующее 100 мас. ч., пористый алюмосиликатный наполнитель 5-90 мас. ч., магнитный наполнитель 10-85 мас. ч., минеральное масло 3-20 мас. ч. Сорбционная способность составляет 1 г сорбента на 0,4 г нефти.

Для того чтобы сорбент намагничивался в магнитном поле используют ферромагнетики, состоящие в основном из Fe, Cr, Co, Ni. Оксид железа является наиболее часто применяемым материалом в качестве сорбента. При этом исследователи главной задачей ставят модифицирование поверхности сорбента, которое направлено на уменьшение водопоглощения. В различных методах создания сорбента используются частицы размерами от 10 нм до 100 мкм. Способы получения также различны, например, измельчением породы путем перемалывания в коллоидных мельницах, химическими методами и т. д. При осаждении мелкодисперсных ферромагнетиков химическим путем необходима стабилизация частиц для предотвращения образования крупных агломератов. Для этого в качестве поверхностно-активного вещества применяют низкомолекулярные жирные кислоты: олеиновая кислота, стеариновая кислота. В углеводородной среде частицы стабилизируют в 0,1 - 0,5 % - ном растворе олеиновой или стеариновой кислоты. Полученная суспензия получила название «магнитная жидкость».

Рассматриваемые способы очистки предназначены для очистки от эмульгированных нефтепродуктов. Типы эмульсий главным образом зависят от компонентов, их состава и концентрации примесей в пластовых водах. Поэтому нефтепродукты (НП) находятся в водах в неэмульгированном, грубоэмульгированном, тонкоэмульгированном и молекулярном состояниях [3]. К наиболее просто извлекаемым нефтепродуктам относятся неэмульгированная и грубоэмульгированная нефть. При этом не требуется использовать дополнительных методов для укрупнения. Обычно такие нефтепродукты достаточно эффективно извлекаются из воды в отстойниках. Труднее дело обстоит с тонкоэмульгированными НП. Чем выше степень стабилизации эмульсий, тем сильнее их агрегативная устойчивость. В обычных условиях в таких эмульсиях не происходит слипания и слияния капель эмульсии. Для того, чтобы происходило укрупнение эмульсионных капель применяют различные методы электрокоагуляции и реагентной коагуляции. Для сильностабилизированных эмульсий применяют деэмульгаторы, которые ослабляют у них оболочку и снижают агрегативную устойчивость.

Стабилизированный слой эмульсии возникает при размещении молекул асфальтенов и смол на разделе фаз в пограничном слое [123]. При этом молекулы асфальтенов и смол очень близки по элементному составу и построены по единому принципу, в основание которых входят полярные гибридные соединения кольцевой формы и гидрофобные алкильные цепи. Полярная часть молекул асфальтенов и смол занимает область в пограничном слое воды и нефти, при этом неполярная цепь молекулы остается в нефти. В пластовых водах также содержатся механические частицы и поверхностно - активные вещества. При этом высокодисперсные твердые частицы сорбируются на поверхности капли нефти, взаимодействуя с полярными молекулами асфальтенов [123]. В зарубежной работе [123] испытания проводились с разными твердыми частицами размерами меньше микрона. Показано, что гидрофобная твердая частица, имеющая угол контакта больше 90° стабилизирует эмульсию воды в нефти (рисунок 1.2, б).

Иначе, если гидрофильные частицы, имеющие угол контакта меньше 90^0 , то происходит образование эмульсий типа нефть в воде (рисунок 1.2, в).

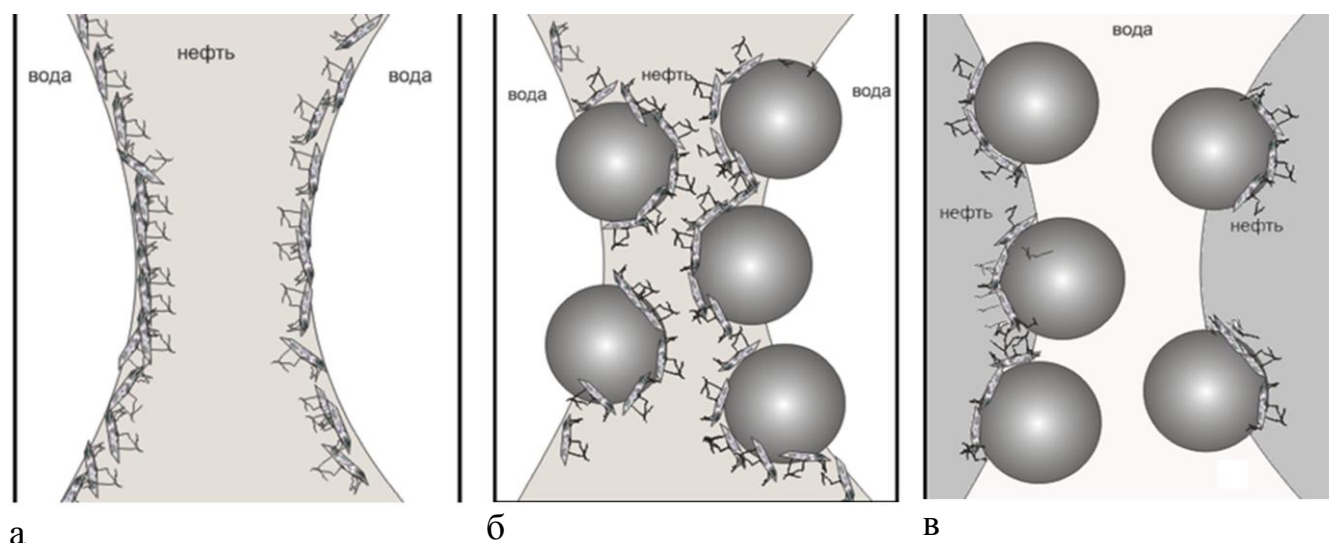


Рисунок 1.2 – Фазовое состояние воды и нефти: а – эмульсия типа «вода в нефти»; б – стабилизация неорганическими твердыми частицами эмульсии «вода в нефти»; в – стабилизация неорганическими твердыми частицами эмульсии «нефть в воде»

Концентрация и размер твердых веществ также влияют на инверсию фаз. Низкое содержание твердых частиц сохраняет стабильность эмульсий вода в нефти. При увеличении концентрации адсорбирующих асфальтены частиц происходит инверсия типа нефть в воде. Наряду с этим большие твердые частицы, не способные адсорбироваться на границе раздела воды и нефти, не стабилизируют эмульсии. Таким образом, при использовании мелких ферромагнитных частиц получаем возможность извлечения глобулы нефти из воды силовым воздействием магнитного поля. Для высокодисперсных частиц с маленьким магнитным моментом возникает вопрос применимости того или иного магнитного сепаратора.

Наноразмерные частицы магнетита Fe_3O_4 и маггемит $\gamma-Fe_2O_3$, проявляющие превосходные магнитные свойства, находят применение в биомедицинских целях, устройств хранения магнитных данных, тонеров и чернил для ксерографии, магнитно-резонансной томографии, биосепарации, в качестве мягких ферритов [101], в химических реакциях [118], в нефтепромысловом деле [7]. Таким образом, использование нанодисперсного (1-100 нм) магнетита для очистки воды

от нефтепродуктов является перспективным направлением в силу того, что такие частицы не надо гидрофобизировать. За счет большой поверхностной энергии и малого размера, твердые частицы собираются на границе фаз нефти и воды. Использование наноразмерных частиц в этом качестве требует специальных системных исследований, которые до настоящего времени применительно к очистке воды от эмульгированной нефти не проводилась.

1.1.2 Принцип работы магнитных сепараторов

Магнитный очистительный сепаратор – это очистительный сепаратор, действующий посредством сил магнитного поля (ГОСТ 26070-83). Магнитный сепаратор является инструментом, предназначенный для захвата ферромагнитных примесей из жидкости или сыпучего материала за счет силового воздействия неоднородного магнитного поля. Каждый такой магнитный сепаратор адаптирован к конкретным условиям эксплуатации. Межгосударственный стандарт на изготовление, основные типы, параметры, размеры и комплектацию магнитного сепаратора приведен в **ГОСТ 10512-93**.

Магнитный сепаратор в настоящей работе должен быть предназначен для захвата ферромагнитных частиц с маленьким магнитным моментом. Наиболее важными характеристиками магнитных сепараторов являются магнитное поле и градиент магнитного поля.

1.1.3 Существующие типы магнитных сепараторов для очистки нефтезагрязненных жидких сред

Ранее были рассмотрены подходы по магнитной очистке воды от нефтепродуктов. Точнее, речь шла об используемых сорбентах и способах их подготовки. Среди рассмотренных работ лишь в нескольких представлены описания магнитных сепараторов. Краткое описание было представлено в работе [67], где разделение порошка от воды осуществляли переменным магнитным полем с частотами от 10 до 1000 Гц при напряженности около 100 кА/м. В работе [72] магнитный сепаратор представляет собой намагничивающее устройство с антифрикционными пластинами, в котором частицы намагничиваются и в турбулизаторе образуют конгломераты за счет остаточной намагниченности.

В работе [69] предложен схема магнитной обработки жидкости или газа и удаления ферромагнитных частиц из потока жидкости или газа (рисунок 1.3, а).

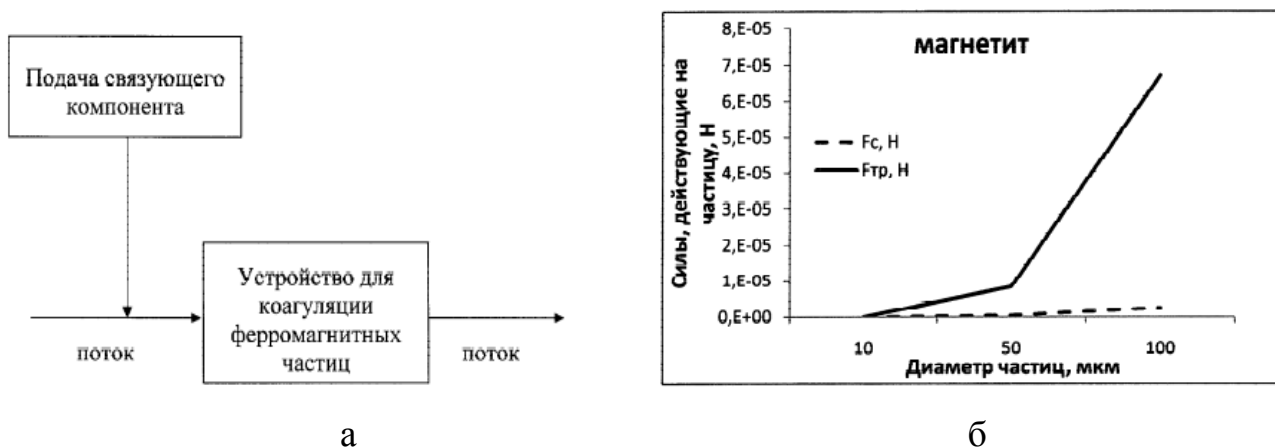


Рисунок 1.3 – Способ обработки жидкости или газа от магнитных частиц: а – схема обработки; б – силы, действующие на магнетитовую частицу (магнитная восприимчивость $\chi=6,36$), находящуюся на поверхности магнита диаметром 10 мм [69]

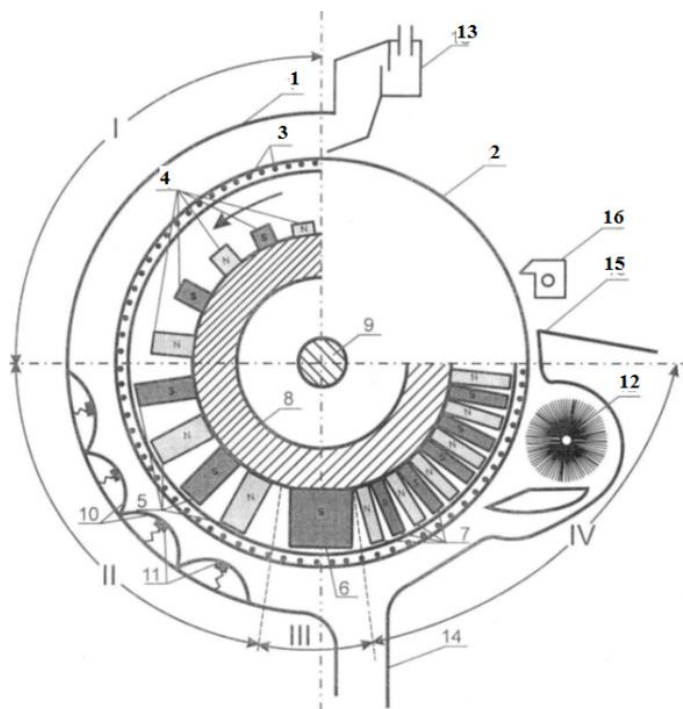
Устройство в этой схеме для удаления ферромагнитных частиц состоит из точечных постоянных магнитов. Процесс очистки управляется с помощью изменения режима течения потока. При изменении режима течения потока контролируется сила лобового сопротивления. При увеличении потока частицы отрываются от поверхности точечных магнитов. Для улучшения эффекта коагуляции в поток дополнительно вносят связующий компонент. Таким образом, контролируется осаждение частиц различной магнитной восприимчивостью на магнитную поверхность.

Как известно [77, 61], сила действующая на магнитную частицу в неоднородном магнитном поле определяется формулой:

$$F_m = V_q (M_q \cdot \nabla) B, \quad (1.2)$$

где V_q – объем магнитной частицы, $B = \mu_0 H$ – магнитная индукция, M_q – намагниченность магнитной частицы. На рисунке 1.2, б представлен график силы трения и силы лобового сопротивления. Автор на основе таких данных делает вывод, что частицы магнетита не будет срывать потоком жидкости с поверхности магнитов.

Магнитный сепаратор в работе [70] предназначен для извлечения магнитовосприимчивых частиц из жидких сред. Устройство (рисунок 1.4) состоит из корпуса 1, внутри которого расположен вращающийся немагнитный барабан 2 со встроенными ферромагнитными стержнями 3. Магнитная конструкция, неподвижно закрепленная с основанием сепаратора, состоит из постоянных магнитов 4 с чередующейся полярностью. Загрузка пульпы происходит через загрузочное устройство 13. При прохождении через зону 1, 2, 3 флоккулы магнетита концентрируются, избавляясь от немагнитных компонентов. Индукционная щетка 12 захватывает магнитные частицы с барабана. Агрегаты, насыщенные ферромагнетитками, размываются с помощью системы подачи воды 16 в устройство для разгрузки концентрата 15.



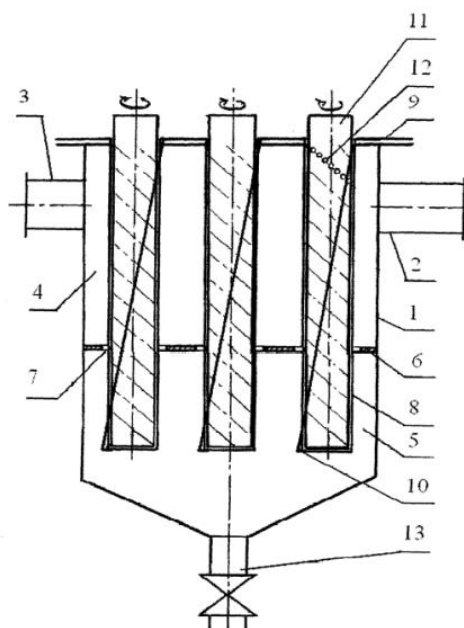
1 - корпус, 2 - барабан, 3 - ферромагнитные стержни, 4 - магнитная система с постоянными магнитами, 5 - постоянные магниты второй зоны, 6 - постоянный магнит третьей зоны, 7 - постоянный магнит четвертой зоны, 8 - магнитопроводящее ярмо, 9 - вал, 10 - подпружиненные диафрагмы, 11 - постоянные магниты, 12 - цилиндрическая индукционная съемная щетка, 13 - загрузочное устройство, 14 - вывод хвостов, 15 - вывод концентрата

Рисунок 1.4 – Центральное сечение магнитного сепаратора [70]

Этот магнитный сепаратор предназначен для горнодобывающей и металлургической промышленности для обогащения магнитных руд и

материалов. Кроме того, не приведены его характеристики индукции магнитного поля и градиента, поэтому устройство не может быть применено для извлечения воды от эмульсии со слабым магнитным моментом.

Извлечение ферромагнитных примесей из жидких сред может быть также осуществлено на магнитном сепараторе [61] в нефтедобывающих, химических, металлургических и других отраслях промышленности. Магнитный сепаратор (рисунок 1.5) состоит из корпуса 1, патрубка входа 2 и выхода 3. Жидкость, поступающая в сепаратор, движется в зону 4 и попадает на трубы 8. Внутри труб расположены вращающиеся цилиндры 11, на поверхности которых прикреплены по спирали постоянные точечные магниты 12. Прилипшие к поверхности магнитные частицы по направляющим 10 поступают в бункер 5, где извлекаются по каналу 13.



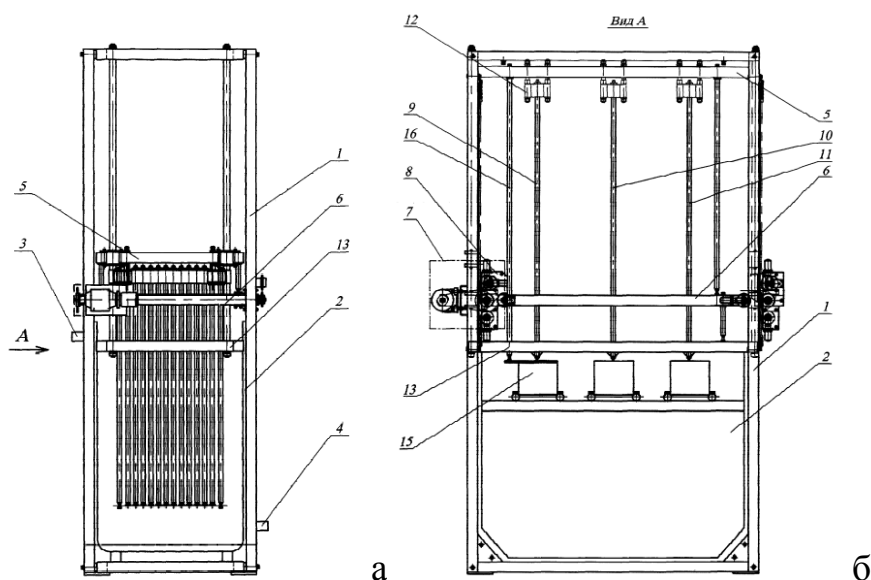
1 - корпус, 2 - патрубок входа, 3 - патрубок выхода, 4 - зона осаждения, 5 - зона сбора уловленных частиц (бункер), 6 – перегородка, 7 - отверстия, 8 - осадительные элементы в виде полых труб, 9 – кровля, 10 - направляющие, выполненные по спирали, 11 – цилиндры, 12 - точечные постоянные магниты, 13 - кран

Рисунок 1.5 – Общий вид магнитного сепаратора [61]

В устройстве (Рисунок 1.5) вращающиеся соседние магнитные стержни 1 с одинаковым периодом вращения образуют встречную пару источников с большим градиентом магнитного поля [61]. Но величины максимального

градиента и индукции магнитного поля не приведены. В описании устройства также нет информации о размерах извлекаемых ферромагнитных частиц. Из-за отсутствия всех этих данных устройство не рассматриваем для применения в настоящей работе.

Магнитный сепаратор (рисунок 1.6 а, б) предназначен для магнитной очистки технологических, смазочно-охлаждающих жидкостей, моющих растворов [63]. Разделитель состоит из стойки 1, расположенной по периметру емкости 2, и отводящих каналов 3, 4. Магнитная очистка проводится при помощи патронов 9, 10, 11, которые изготовлены в виде набора постоянных магнитов с индукцией от 0,1 до 3 Тл. Для очистки от шлама платформа 5 поднимается в верхнее положение при помощи электродвигателей 7 и сбрасывается на конвейеры 15.



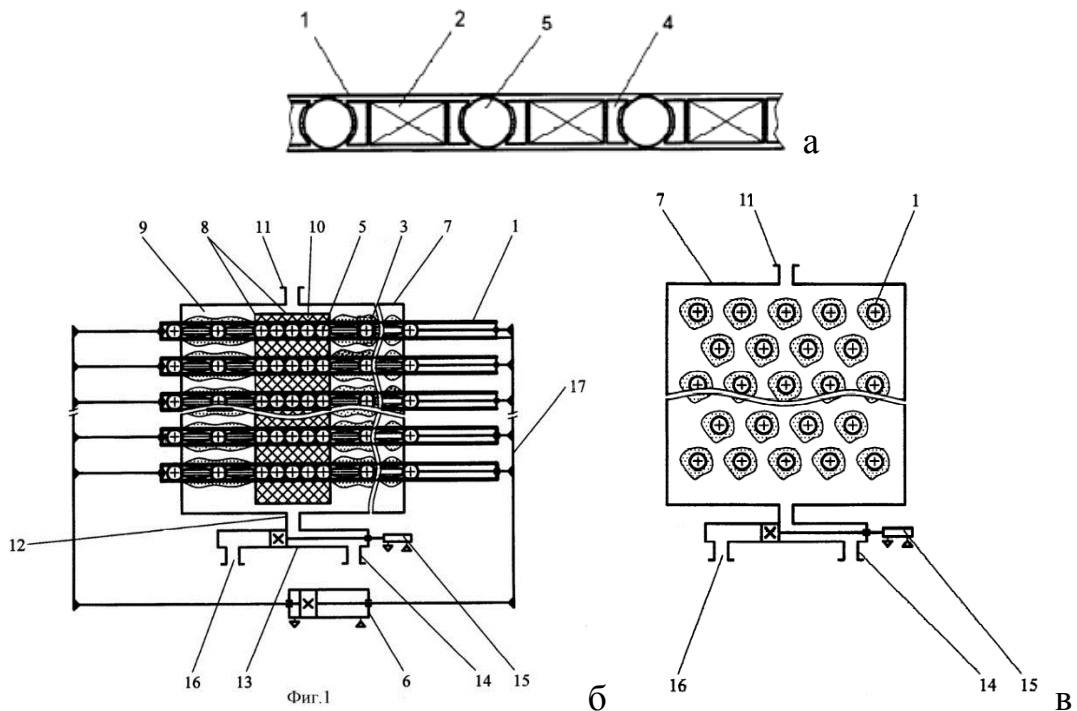
1 - стойка, 2 - емкость, 3 и 4 - подводящие и отводящие патрубки, 5 - верхняя платформа, 6 - нижняя платформа, 7 - электродвигатель, 8 – редуктор, 9, 10, 11 - ряд патронов, 12 - плита, 13- шламосьемник, 15 - приводной подводимый конвейер, 16 – балка

Рисунок 1.6 – Общий вид патронного магнитного сепаратора [63]: а – в режиме разделения, б – в режиме промывки

Расстояние между рядами в платформе выбирается так, чтобы магнитное влияние соседних рядов было минимальным. Таковым будет расстояние не менее 6 см, что является большим расстоянием экстракции для слабомагнитной эмульсии. Стержни находятся в одном ряду и изготовлены из постоянных

магнитов с индукцией от 0,1 до 3,0 Тл в форме дисков, но градиент магнитного поля не определен в рабочей зоне.

В работе [65] магнитный сепаратор предназначен для очистки технических жидкостей. Магнитовод (рисунок 1.7, а) имеет форму трубки 1 из немагнитного материала. Внутри магнитовода расположены подвижные магнитные шайбы 2, между которыми находится немагнитный комплект. Этот комплект состоит из двух шайб 4, между которыми находится шарик 5 [65]. Техническая жидкость поступает через канал 11 в рабочую камеру 9. Далее под воздействием магнитного поля жидкость очищается от ферромагнитных частиц и выходит из камеры по каналу 12. Во время очистки магнитная упаковка помещается в нерабочую камеру 10. Очистка проводится путем смывания шлама потоком жидкости.

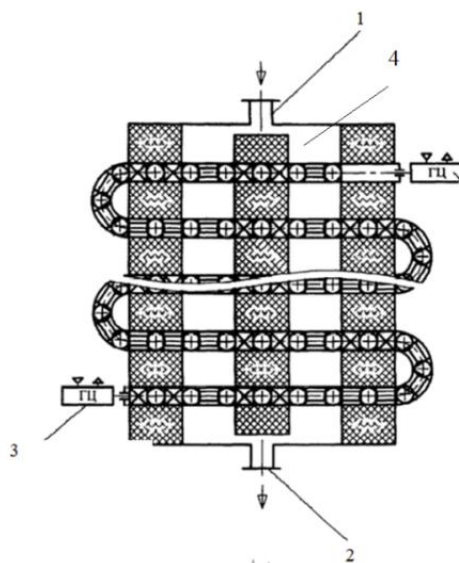


1- трубки, 2 - магнитные шайбы, 3 - немагнитный магнитопроводящий комплект, 4 - две седловидных шайбы, 5 – шарик немагнитный, 6 - шток линейного привода, 7 – корпус, 8 - патрубки и перегородки, 9 – рабочая камера, 10 - нерабочая камера, 11 - патрубки подачи очищаемой жидкости, 12 - отвод очищенной жидкости, 13 - золотник, 14, 16 – патрубки, 15- пневмоцилиндр, 17 - шток

Рисунок 1.7 – Общий вид магнитного сепаратора с трубчатым магнитоводом: а – магнитовод; б – продольный разрез сепаратора; в – поперечный разрез сепаратора[65]

Течение очищаемой жидкости, как и во всех предыдущих конструкциях, протекает поперек стержней. По степени очистки устанавливается скорость течения воды в сепараторе по формуле $E=B/V$, где V - скорость очистки, B - переменная величина, зависящая от вида жидкости, конструктивных параметров устройства и других показателей [65]. Конструкционные особенности представлены только общие и сведения о производительности не раскрыты.

Похожее техническое решение предложено в работе [68] (рисунок 1.8). Во время очистки жидкости магниты находятся в рабочей камере, а в режиме промывки они направляются гидроцилиндрами в нерабочую зону. При этом течение жидкости направлено перпендикулярно стальным стержням. Магнитная система выполнена в виде труб, внутри которых расположены постоянные кольцевые магниты, чередующиеся с шариками. Перемещение такой магнитной системы внутри труб выполняется с помощью обычного толкательного механизма, который может быть изготовлен в виде линейного привода.

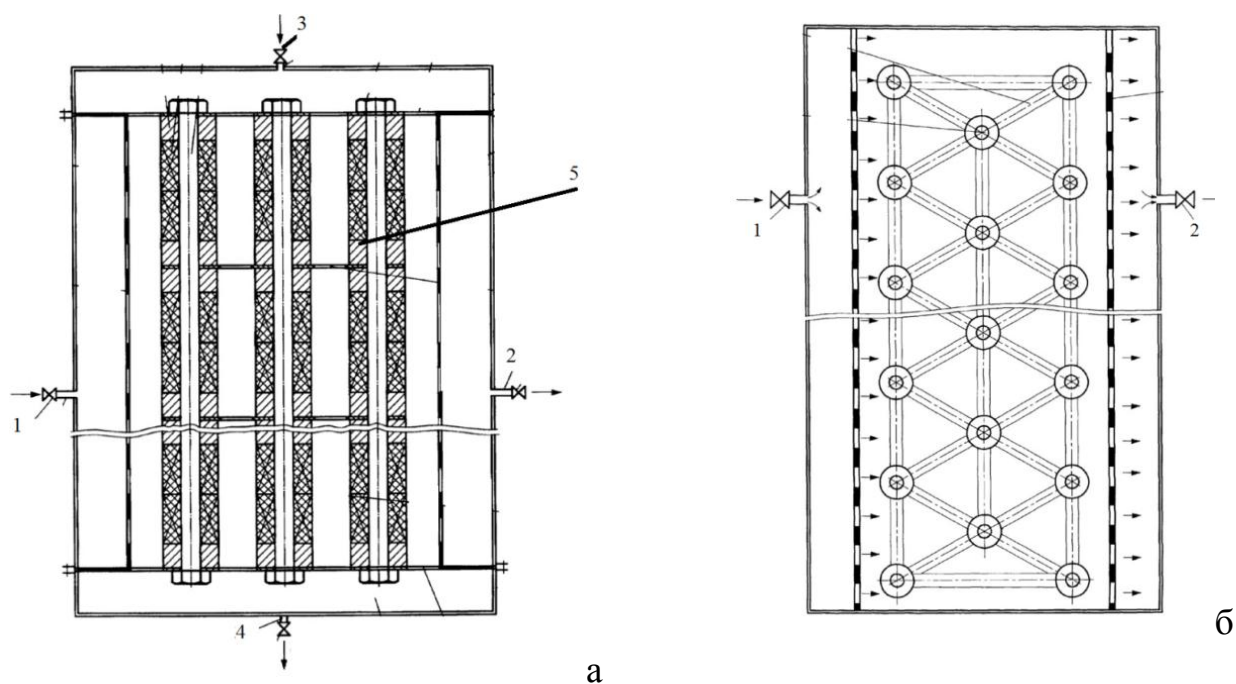


1 – входной патрубок, 2 – выходной патрубок, 3 – гидроцилиндр, 4 - рабочая зона

Рисунок 1.8 – Продольный разрез сепаратора с линейным трубчатым магнитоводом [68]

В работе [64] магнитные стержни 5 сепаратора (рисунок 1.9) расположены перпендикулярно потоку ламинарного течения. Промывка рабочих элементов от ферромагнитных частиц с поверхности магнитных стержней выполняется жидкой

средой в турбулентном потоке, направленным вдоль оси магнитных стержней сверху вниз после отключения магнитного поля линейным приводом [64].

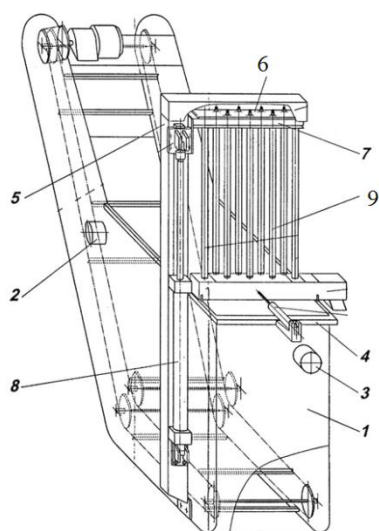


1 – входной патрубок, 2 – выходной патрубок, 3 – патрубок промывочной жидкости, 4 – выходной патрубок промывки, 5 - магнитные стержни, собранные из кольцевых магнитов

Рисунок 1.9 – Общий вид магнитного сепаратора с трубчатым магнитоводом: а – продольный разрез сепаратора, б – поперечный разрез сепаратора [64]

В рассматриваемых устройствах на рисунке 1.8 и 1.9 представлены общие технические решения, связанные с обслуживанием и способом промывки, а характеристики габаритов устройства и примеры испытаний не приведены. Таким образом, нет возможности установить применимость этих устройств для очистки воды от эмульгированных нефтепродуктов с применением нанодисперсного магнитита.

Магнитный сепаратор на рисунке 1.10 также предназначен для очистки жидкости от твердых коллоидных частиц [58]. В режиме очистки траверса 7 вместе с плитой 12 находятся в опущенном режиме. В этом состоянии магнитные патроны 9 находятся в очищаемой жидкости. Жидкость течет в перпендикулярном направлении магнитных патронов. Для очистки рабочих элементов от ферромагнетиков гидроцилиндр 8 поднимает вверх траверсу 7 с плитой 12 [58].



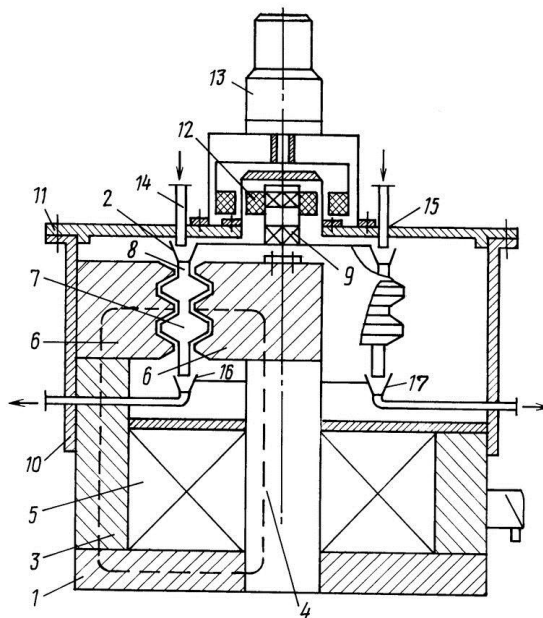
1 – емкость для очищаемой жидкости, 2, 3 -подводящий и отводящий патрубки, 4 - установочная рама, 5 - вертикальная колонка, 6 –плита, 7 – траверса, 8 – привод, 9 - магнитные патроны

Рисунок 1.10 – Общий вид кассетно-патронного магнитного сепаратора и его основных узлов [58]

Магнитные патроны на плите расположены в два ряда и более с шахматным расположением. Автором раскрыты некоторые технические характеристики устройства. Расстояния между тремя соседними патронами в двух рядах могут варьировать в пределах 15-40 мм [58]. Как и в ранее представленных устройствах, магнитные патроны изготовлены в виде чередующихся постоянных магнитных дисков и магнитомягких полюсных наконечников, помещенных в немагнитную гильзу. Представлена только общая техническая характеристика, без сведений о размерах извлекаемых ферромагнитных частиц.

Бывают также магнитные сепараторы на электромагнитах. Магнитный сепаратор (рисунок 1.11) [55] предназначен для очистки технологических жидкостей от мелкодисперсных частиц. В рабочем канале между полюсами 6 создается высокоградиентное магнитное поле электромагнитной катушкой 5. Привод 13 приводит во вращательное движение ротор 2. Вода, загрязненная ферромагнитными частицами, поступает в рабочую область по трубам 14. Магнитное поле и турбулентность потока, созданное разностным диаметром сечения рабочего канала в зоне зубцов, способствуют тому, что ферромагнитные частицы осаждаются на стенках рабочего канала ротора. В ходе эксплуатации

заполняется сборник. Жидкость из рабочей области поступает в сборник 16. При заполнении каналов ферромагнетиками ротор, вращаясь, выводит заполняемые ячейки из зоны подачи очищаемой жидкости и основного магнитного поля и промывается промывочной жидкостью из патрубка 15.



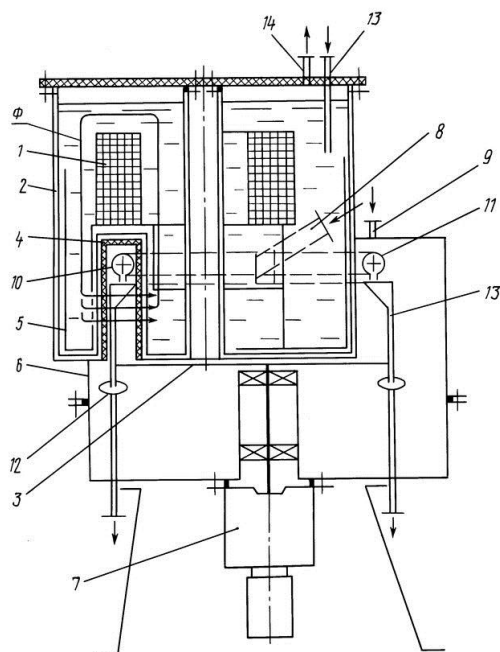
1 - электромагнитная система, 2 - вращающийся ротор, 3 - наружный магнитопровод, 4 - центральный стержень, 5 - кольцевая катушка возбуждения, 6 - полюсные наконечники, 7 – сборник, 8 - радиальные немагнитные проставки, 9 – ось, 10 – герметичная камера, 11 – крышка, 12 – герметичная муфта, 13 – электропривод, 14, 15 – входные патрубки очищаемой и промывочной жидкости, 16, 17 – сборники отвода жидкости очищенной и промывочной

Рисунок 1.11 – Общий вид электромагнитного сепаратора и его основных узлов [55]

Автор заявляет, что мелкодисперсные ферромагнитные частицы размерами до 0,1 мкм извлекаются за счет создания в канале высокоградиентного магнитного поля с индукцией до 2 Тл за счет трапециодальных и противоположно расположенных зубцов 6. При этом не раскрыта величина магнитной восприимчивости извлекаемых частиц. Нет так же оценки градиента магнитного поля в рабочем канале.

Электромагнитный сепаратор (рисунок 1.12) [56] выполнен из сверхпроводящей катушки возбуждения и сверхпроводящего экрана, которые находятся в сосуде Дюара. При этом для обеспечения сверхпроводимости

катушки 1 и экрана 5 в сосуд Дюара должен периодически заправляться жидким гелием. Очищаемая вода поступает в рабочую зону по патрубку 8 и коллектор 10. Частицы с малой магнитной восприимчивостью оседают на стенках рабочей камеры. По патрубку 12 происходит отвод чистой воды [56].



1 - катушка возбуждения, 2 - сосуд Дюара с жидким гелием, 3 - вращающийся ротор, 4 – теплоизоляция сосуда Дюара, 5 – экран из сверхпроводящего материала внутри сосуда, 6 - герметичная камера, 7 – электроприводом, 8,9 - патрубки ввода очищаемой и промывочной жидкостей в рабочий канал, 10, 11 - коллекторы, 12, 13 - отвод через коллекторы и патрубки, 13 -патрубок подачи жидкого гелия производится через патрубок, 14 - патрубок отвода газообразного гелия

Рисунок 1.12 – Общий вид электромагнитного сепаратора со сверхпроводящей катушкой и его основных узлов [56]

Таким магнитным сепаратором создается высокоградиентное магнитное поле с индукцией 3,5 – 4 Тл. Автор утверждает, что устройство способно извлекать мелкодисперсные и слабомагнитные частицы. Предлагаемый сепаратор [64] способен извлекать частицы дисперсностью менее 0,1 мкм и со слабой магнитной восприимчивостью при полной герметичности процесса. При этом не определен магнитный момент извлекаемых частиц, поэтому не удастся принять решение о применимости магнитного сепаратора для рассматриваемого метода очистки.

Кроме описанных выше, существуют также магнитные сепараторы на электромагнитах. Обобщая принципы работ магнитных сепараторов можно составить следующую классификацию таких сепараторов.

Барабанные сепараторы, как правило, используют систему сильных редкоземельных постоянных магнитов NdFeB. Такого принципа сепараторы используют наиболее часто для разделения магнитовосприимчивых частиц из сухой смеси, хотя из жидкостей тоже используется [70]. *Плоские магнитные сепараторы* представлены в виде пластин или платформ. Такие устройства используются также для разделения сыпучих материалов. Наиболее часто применяемая конструкция для разделения жидкости от ферромагнитных частиц – это магниты, представленные в виде системы самых разнообразных *выдвижных решеток* [61, 63, 65, 68, 64, 58]. По-другому их еще называют кассетные или патронные магнитные сепараторы. Чаще всего упаковка таких сепараторов имеет форму цилиндров, стержней.

Каждое устройство предназначено для конкретных условий эксплуатации. При этом имеют возможность извлекать из среды ферромагнитные частицы с определенной магнитной восприимчивостью. Эффективность работы магнитного сепаратора увеличивают чаще всего за счет градиента и индукции магнитного поля в рабочей зоне. Исходя из анализа, не представляется возможным определиться с типом сепаратора из-за того, что в исследованиях недостаточно детально описана конструкция устройств. В настоящей работе требуется разработать сепаратор, способный извлекать эмульгированные нефтяные частицы с магнитным моментом менее 10^{-14} Ам^2 . Таким образом, существующие типы магнитных сепараторов не могут быть использованы по прямому назначению для очистки эмульгированных пластовых вод, что требует разработки магнитного сепаратора специальной конструкции.

1.2 Существующие методы оценки эффективности очистки вод от нефтепродуктов с применением магнитных сепараторов

1.2.1 Нормы предельно допустимых концентраций нефтепродуктов в пластовых водах

Эффективность работы очистных сооружений необходимо оценивать путем сравнения достигаемой степени очистки с нормативным значением [19]. Эффективность применения предлагаемого метода для очистки воды рекомендуется ассоциировать главным образом с качеством воды на выходе, а также скоростью очистки и экономической целесообразностью.

Качество вод – это характеристика состава и свойств воды, определяющая пригодность её для конкретного вида водопользования (ГОСТ 17.1.1.01-77. «Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения»). При добыче нефти используемая вода для заводнения нефтяных пластов должна отвечать определенным показателям и нормам качества (ОСТ 39-225-88 «Вода для заводнения нефтяных пластов. Требования к качеству»). В таблице 1.1 представлены основные требования к содержанию эмульгированных нефтепродуктов в подтоварной воде, закачиваемой в продуктивный коллектор.

Таблица 1.1 – Допустимое содержание нефти в закачиваемой в продуктивный коллектор воде с целью поддержания пластового давления (ОСТ 39-225-88).

Проницаемость пористой среды коллектора, мкм ²	Коэффициент относительной трещиноватости коллектора	Допустимое содержание нефтепродуктов в воде, мг/л
до 0,1 вкл.	-	до 5
свыше 0,1	-	до 10
до 0,35 вкл.	от 6,5 до 2 вкл.	до 15
свыше 0,35	менее 2	до 30
до 0,6 вкл.	от 3,5 до 3,6 вкл.	до 40
свыше 0,6	менее 3,6	до 50

Для питьевой воды контроль качества более жесткий 0,1 мг/л (СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения»). Для рыбохозяйственных

водоемов ПДК 0,05 мг/ л определяется приказом Росрыболовства № 20 от 18.01.2010г «Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения», утвержденный.

Большинство Тимано-Печорских месторождений характеризуется сложным геологическим строением с тектоническими разрушениями и зачастую низкопроницаемыми коллекторами. Например, Печоро-Колвинский авлакоген имеет среднюю продуктивность НГК с проницаемостью ниже 500-900 мД. При этом для нижнедевонских отложений проницаемость может иметь значения всего 0,5-9,5 мД. Требование ОСТ 39-225-88 для таких коллекторов такая, что массовая доля нефтепродуктов в пластовой воде должна быть менее 5 мг/л. При этом среднее значение нефтепродуктов в пластовой воде для коллекторов Печоро-Колвинского авлакогена составляет 30 мг/л.

1.2.2 Методы оценки эффективности применения магнитного сепаратора

Качество и скорость очистки воды зависят от сорбционной способности применяемого сорбента и возможностей магнитного сепаратора. Эффективность применения магнитного сепаратора определяется его возможностью захватить частицу с определенным магнитным моментом. Отметим, что магнитный сепаратор, исходя из аналитической формулы 1.2, должен иметь магнитную индукцию достаточную для магнитного насыщения ферромагнитных частиц и сильный градиент магнитного поля dB/dx . Также отметим, что кроме этих двух параметров, на скорость очистки влияет время, за которое частица будет захвачена. Среди ранее рассмотренных магнитных сепараторов, авторы не раскрывают конструктивных особенностей устройств и теоретических расчетов, что исключает возможность сравнительной оценки эффективности предлагаемых магнитных сепараторов. Эти методы должны быть основаны на аналитических зависимостях или построенных математических моделях. Высокие требования экономической эффективности, экологической безопасности, которые предъявляются к магнитным сепараторам, используемым в различных областях промышленности, обуславливают разработку и оптимизацию устройства

методами системного анализа [11]. Процесс оптимизации состоит из целевой функции и критериев оптимальности целевой функции [91]. При разработке магнитного сепаратора в качестве критериев принимают стоимость оборудования, энергоёмкость, ресурсоёмкость, стоимость обслуживания системы и многое другое [11, 92, 94]. Но чаще всего рассматривают экономическую целесообразность.

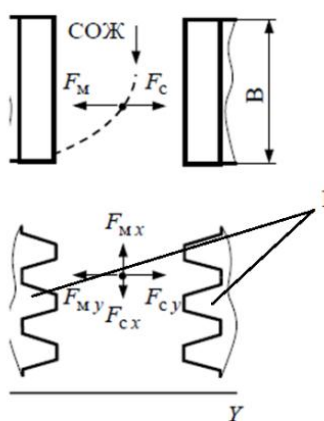
Автор [13] предлагает выполнить разработку нового оборудования для очистки пластовых вод методом системного анализа в три этапа:

- 1). Анализ критериев эффективности очистки.
- 2). Анализ параметров процесса очистки от примесей.
- 3). Анализ эффективности средств очистки.

Существует методика оценки степени очистки [11] путем определения траектории движения ферромагнитной частицы (рисунок 1.13) в магнитном сепараторе, которая определяется по следующему закону:

$$mr = F_M + F_C \quad (1.3)$$

где m – масса частицы, кг; r – ускорение частицы, m/c^2 ; F_M – магнитная сила, H ; F_C – сила сопротивления, H .



1 – полюсы магнитов в рабочей зоне сепаратора, F_M , F_C , F_{Mx} , F_{My} , F_{Cx} , F_{Cy} – силовые составляющие магнитного поля и вязкого сопротивления

Рисунок 1.13 – Расчет сил действующих на ферромагнитную частицу [78]

При этом магнитная сила определяется по формуле 1.2, а вязкая сила сопротивления: $F_C = 3\pi\eta dv$, где $\eta = 8.9 \cdot 10^{-4}$ Па·с – динамическая вязкость воды, d –

диаметр частицы (m), v – скорость частицы (м/с). Далее приближенными методами определяется напряженность магнитного поля и магнитная сила, а после этого оценивается степень очистки от феррочастиц. Автором в работе [78] оценивается расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не более 15-20 %. В модели не учитывается механизм образования конгломератов в магнитном поле и толщина гидратной оболочки [13], поэтому не представляется возможным определить ферромагнитную составляющую в агрегате и определить магнитный момент частицы.

Основной метод оценки работы магнитного сепаратора основывается на построении математической модели с учетом его конструктивных особенностей. На рисунке 1.14 приведены некоторые варианты оптимизации магнитного сепаратора [78]. На рисунке 1.14 а представлена оптимизация целевой функции ε по габаритным параметрам А, Б, В, Д, Е и γ магнитного сепаратора. На рисунке 1.14 б оценка целевой функции ε (степень очистки) путем изменения напряженности магнитного поля H . При увеличении напряженности магнитного поля до 60 кА/м степень очистки ε увеличивалась до 0,85, а дальше плавно до 0,95. При дальнейшем увеличении выше 100 кА/м величина ε не менялась. Скорость пропускания смазочно-охлаждающей жидкости V (СОЖ) через электромагнитный сепаратор (ЭМС) на рисунке 1.14 в, так же требует оптимизации. Снижение качества очистки наблюдается при увеличении скорости очистки. Степень очистки жидкости зависит также от свойств ферромагнитной смеси. Устройство ЭМС полностью очищало из СОЖ ферромагнитные частицы с размерами более 9 мкм (сталь 40Х9С2), но не работало при размерах частиц менее 7 мкм. Максимизируется эффективность путем определения наибольшего значения по параметрам: скорость, примесей, напряженности. Можно заметить, что на рисунке 1.14 не представлен весь список параметров влияющих на эффективность.

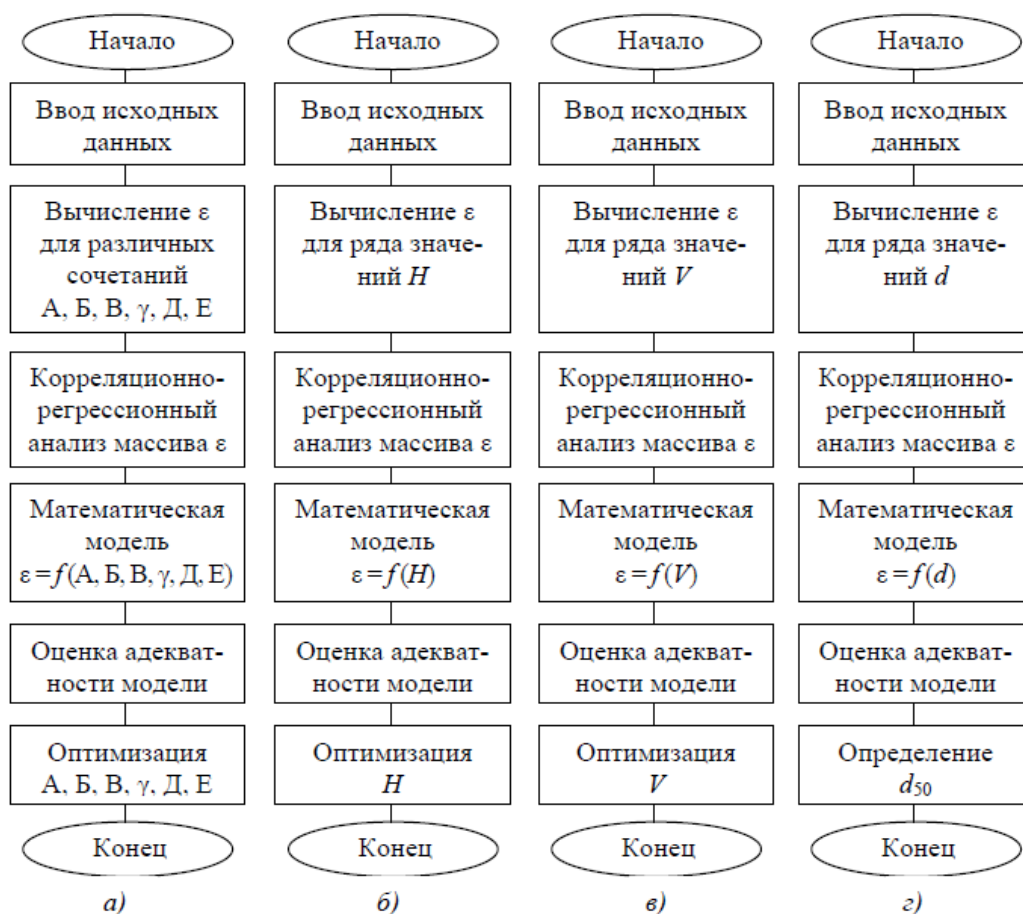


Рисунок 1.14 – Схемы алгоритмов оптимизации конструктивных параметров зоны очистки (а), напряженности магнитного поля в зоне очистки электромагнитного сепаратора (ЭМС) (б), скорости движения смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ) в зоне очистки ЭМС (в) и расчета тонкости очистки СОЖ от механических примесей в ЭМС (г) [78].

Поставленные математические задачи в большинстве случаев решаются численными методами. К примеру, в работе [13] расчет выполнялся методом Эйлера–Коши по алгоритму, который показан на рисунке 1.15.

По алгоритму, представленному на рисунке 1.15, эффективность или степень очистки устанавливается путем определения максимального расстояния извлечения ферромагнитной частицы в рабочей зоне магнитного сепаратора [13, 10]:

$$\varepsilon = \frac{y_i}{y_N} 100\% , \quad (1.4)$$

где y_i – максимальное значение координаты i -й - начальной точки траектории задержанной частицы (для большего значения координаты частицы

проскакивает), $1 \leq i \leq N$; $y_N \approx R + (A/2)$; A – расстояние между магнитными патронами.

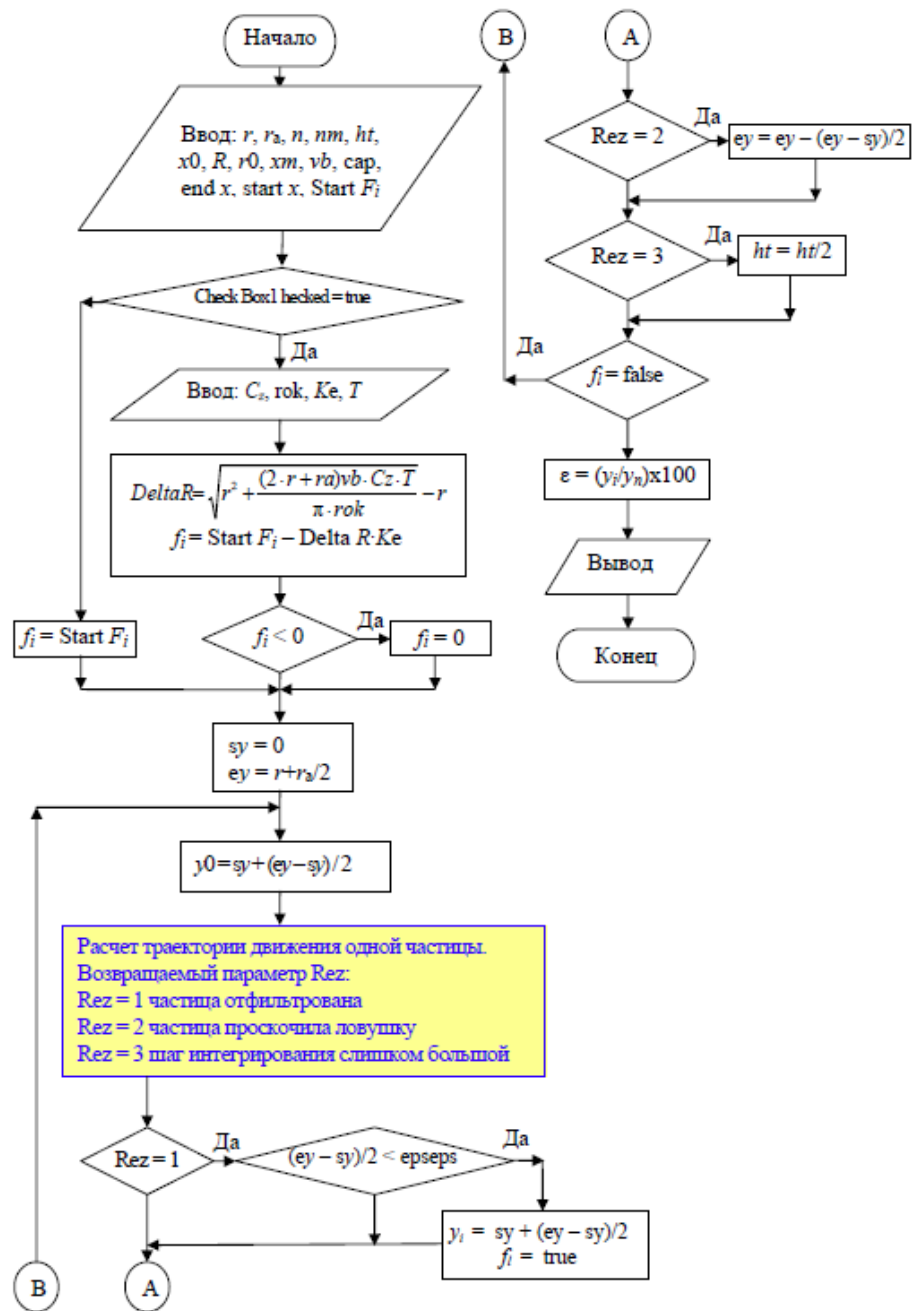


Рисунок 1.15 – Алгоритм расчета степени очистки патронного кассетного сепаратора [13]

Таким образом, эффективность очистки воды от эмульгированных нефтепродуктов с применением магнитных частиц и магнитного сепаратора зависит от упаковки ферромагнитных частиц, индукции и градиента магнитного поля, расстояния извлечения, скорости потока очищаемой жидкости и т. д., поэтому требуется выполнить системный анализ рассматриваемого метода

очистки. Однако существующие математические модели и программы алгоритмической оптимизации конструктивных параметров магнитных сепараторов не могут быть применены по прямому назначению применительно к процессам очистки пластовых вод, что предопределяет необходимость разработки собственных оптимизационных подходов с учетом специфики подготовки пластовых вод к закачке в продуктивный пласт и на основе известных методов математического моделирования.

1.3 Анализ методов моделирования режима работы магнитного сепаратора

Модель – это объект-заместитель объекта-оригинала, обеспечивающий изучение некоторых свойств оригинала [81].

На рисунке 1.16 представлены основные методы моделирования.

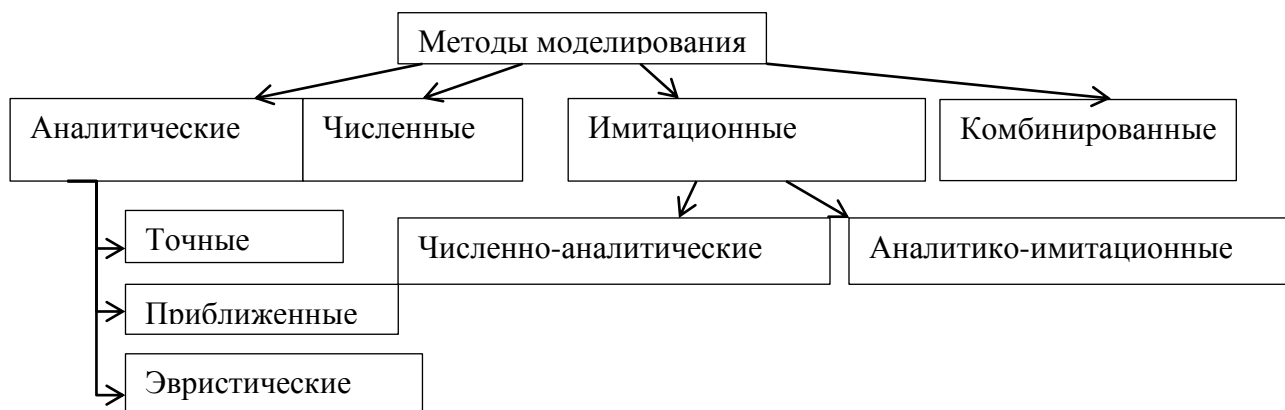


Рисунок 1.16 –Классификация методов моделирования.

Аналитическая модель – это математическое описание структуры и процесса функционирования системы, а также методика определения показателей её эффективности [75]. Метод основывается на формулировке математических законов, связывающих объекты системы, представленных в виде функциональных соотношений (алгебраических, дифференциальных и т. п.). Получение аналитической зависимости позволяет проводить детальное исследование и анализ процессов, протекающий в системе.

Обращение к численным методам моделирования возникают при невозможности получить функциональное соотношение аналитическими

методами. Например, невозможность решения дифференциального уравнения аналитическими методами сводится к численным методам решения.

При имитационном моделировании реализуется алгоритм функционирования системы во времени. В этом процессе моделируется элементарная часть явления, не нарушая целостности структуры. На основе разработанного алгоритма проводится компьютерный эксперимент, отражающий поведение и структуру моделируемого объекта.

При системном анализе и синтезе объекта исследования применяют аналитические и имитационные модели или, по-другому, комбинированные модели. При таком моделировании первоначально проводится процедура декомпозиции объекта исследования с выделением параметров системы и процесса функционирования. После чего к одним процессам применяют аналитическое моделирование, к другим имитационное.

Особенности системного моделирования магнитных сепараторов обусловлены соответствующими требованиями к ним. В ходе процедуры проектирования магнитного сепаратора выделяются основные параметры рассматриваемой системы и критерии оптимизации. Чаще всего среди критериев оптимизации используется производительность и экономическая эффективность [10, 14, 92].

Моделирование режима работы магнитного сепаратора сводится к решению задачи траектории движения частиц в магнитном поле. В работах [10, 13, 34] предложен комплекс моделей для патронных магнитных сепараторов на основе следующих этапов:

1. Детерминированная модель, оценивающая степень очистки водно-технологической жидкости. Основывается на законе, описанном в формуле 1.3. Для определения воздействия магнитной силы составляется двумерная модель магнитного поля рабочего канала. При этом определение напряженности магнитного поля $H(x,y)$ сводится к задаче Дирихле (дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка или уравнение Пуассона с краевыми условиями), которое может быть решено методом Рунге. Метод предусматривает

выбор пробной функции, которая минимизирует определенный функционал и удовлетворяет граничным условиям. При этом современные комплексы программ, позволяющие моделировать двумерные и трехмерные магнитные поля, во многом упрощают решение задачи.

2. Детерминировано-вероятностная модель, которая учитывает механические примеси, дисперсность и наличие гидратной оболочки. В работе [10] составлена математическая модель ε - степени очистки водно-технологической жидкости (ВТЖ):

$$\varepsilon = 1 - C_{И}^{-1} \cdot \sum_{i=1} C_{Иi} \left(1 - \frac{2 \cdot \pi \cdot (R + 0,25 \cdot A) \cdot H \cdot A_{\chi M} \cdot C_{\phi i} \cdot C_{И}^l \cdot d_i^3}{18 \cdot A \cdot V \cdot \eta \cdot C_{Д}^l} \right), \quad (1.5)$$

где R - радиус магнитного патрона, м; H - напряженность магнитного поля, η – динамическая вязкость жидкости Па·с.; A - расстояние между патронами, м; V – скорость прохождения ВТЖ через патроны, м/с; $C_{\phi i}$ - относительное содержание магнитной фракции в оседающей гидратированной частице; $A_{\chi M} = const$ - коэффициент пропорциональности; $C_{И}^l$ - исходная концентрация механических примесей; d_i - размер частиц, м; $C_{Д}^l$ – максимальная концентрация механических примесей в ВТЖ, при которой не наблюдается коагуляция [10].

Адекватность построенной модели, а также оценка эффективности работы магнитного сепаратора проверяется на основе экспериментов.

Наибольшую практику применения магнитных сепараторов можно обнаружить при очистке водно-технологической жидкости от ферромагнитных частиц [10, 34]. При этом эксперименты проводятся на основе выбранных параметров, полученных при моделировании. Количество экспериментов n для каждой серии может быть определено по методике, представленной в работе [2].

При получении линейной модели планирование эксперимента основано на варьировании факторов на двух уровнях. Зная число факторов k , количество опытов можно найти по формуле $N=2^k$, которое следует провести для реализации

всех возможных сочетаний уровней факторов. Если в эксперименте рассматриваются все возможные сочетания уровней факторов, то его называют полным факторным экспериментом [2].

При обработке полученных статистических данных одной из точечных оценок распределения является средняя арифметическая величина измеряемого параметра:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1.6)$$

x_i – единичное значение измеряемой величины (размер частиц, концентрации и т. д.).

Величина дисперсии определяется по формуле:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}. \quad (1.7)$$

Другой подход к определению количества необходимых испытаний. Анализируя точность оценки выборочного среднего, которая вычисляется по формуле:

$$\delta = t_\gamma \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (1.8)$$

можно определить является ли достаточным количество испытаний. t_γ – квантиль распределения Стьюдента (при неизвестном среднеквадратическом отклонении). Исходя из полученных оценок дисперсии и точности математического ожидания, число опытов определяется:

$$N = \frac{t_\gamma^2 S^2}{\delta^2} \quad (1.9)$$

Находится такое количество испытаний, при котором вероятность отклонения от генеральной средней будет меньше выбранной величины P .

В работе [10] для проверки адекватности построенных моделей проводят эксперименты по контролируемым параметрам. На рисунке 1.17 приведен пример зависимости степени очистки ε от скорости V и напряженности поля H .

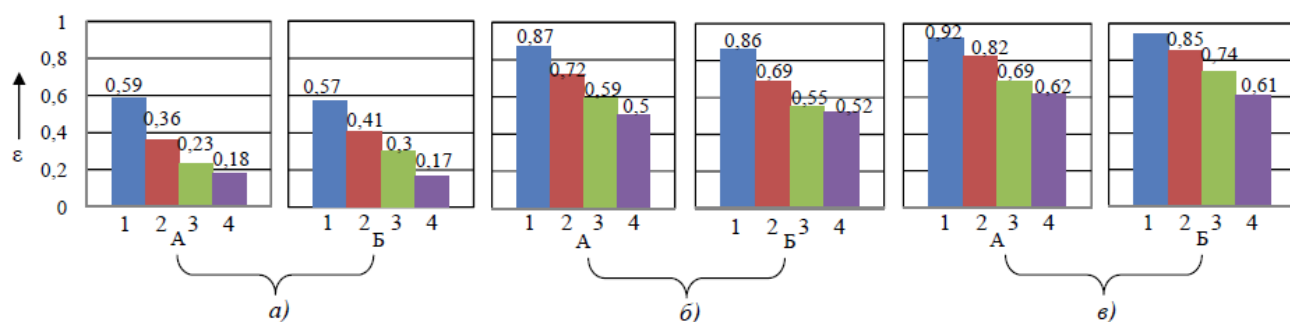


Рисунок 1.17 – Влияние скорости и напряженности магнитного поля сепаратора на очистку от ферромагнитных частиц: А, Б – соответственно экспериментальные и теоретические значения; а, б, в – $H = 20; 40; 60$ кА/м; 1, 2, 3, 4 – $V = 0,0025; 0,005; 0,0075; 0,010$ м/с; $d = 5$ мкм; $\sigma = 1,66$ мкм; концентрация магнитных частиц $C_{и} = 200$ мг/дм³, расстояние между патронами $A = 0,016$ м; $T = 20$ °С; $\eta = 0,001$ Па·с [10].

Модели, полученные в ходе системного анализа, требуют проведения экспериментов, в которых проводится проверка достоверности каждого параметра. Как показал обзор [56, 59, 60, 62, 66, 67, 71, 72], при очистке воды от эмульгированных нефтепродуктов эксперименты проводились с целью проверки либо параметров водопоглощения для магнитного сорбента либо применяемой конструкции магнитной ловушки.

1.4 Пути совершенствования конструкции магнитного сепаратора при доочистке пластовых вод от эмульгированных нефтепродуктов

Разработка конструкции магнитного сепаратора начинается с требований, которым она должен удовлетворять. Большое количество таких требований обуславливают постановку и решение оптимизационных задач. Как известно [91, 10], любая оптимизационная задача состоит из целевой функции и подцелей (критерии оптимизации). Этими вопросами занимается системный анализ, который состоит из следующих этапов:

1. Постановка задачи;
2. Формулировка целей и анализ критериев эффективности;
3. Декомпозиция объекта, анализ параметров системы;
4. Исследование эффективности применения;

На первом этапе определяется наличие проблемы, ее связи с внешней средой и установление возможности ее решения.

На втором этапе проводится формирование общей цели (целевая функция) и его подцелей (критерии эффективности). Целевая функция численно характеризует достижение общей цели $f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) \rightarrow \max, \min$, достижения заданного значения. Целевая функция может быть представлена как:

$$f(G) = \sum_{i=1}^n f_i(G) \cdot k_i, \quad (1.5.1)$$

где $f_i(G)$ - критерий эффективности, $0 < k_i < 1$ – вес критерия (значимость соответствующего критерия эффективности); G – множество элементов (параметров) исследуемой системы, которое выбирается на третьем этапе при декомпозиции объекта исследования. При этом устанавливаются связи и воздействия параметров на систему.

На основе выбранных параметров строится модель (чаще всего комбинированная). Модель составляется для оценки целевой функции по критериям оптимизации.

В работе [10] предложены следующие этапы проектирования магнитного сепаратора для очистки ВТЖ от ферромагнитных примесей на основе системного анализа:

1. Анализ критериев эффективности очистки ВТЖ. На этом этапе проводится исследования наследственности дисперсности [12] на глубину очистки, параметрический анализ эффективности одно- и многоступенчатых тонкослойных гравитационных очистителей. В качестве критериев эффективности в работе [34] выбираются степень очистки, производительность, удельные капитальные вложения.

2. Анализ параметров процесса очистки. На этом этапе на модель накладываются параметры процесса, что позволяет определить сферу и условия их применимости.

3. Анализ эффективности средств очистки. На этом этапе происходит оптимизация конструкционных параметров магнитного сепаратора и выбор

режимов работы с наибольшей эффективностью очистки нефтезагрязненных жидкостей.

Таким образом, проектирование жидкостного магнитного сепаратора для очистки от эмульгированных нефтепродуктов с применением нанодисперсных магнитных сорбентов необходимо начинать с методологических основ разработки устройства, определения условия применимости и выбора критериев эффективности. На основе разработанного устройства оптимизировать тот или иной критерий с учетом выбора наилучшего значения параметра управления процессом очистки, среди которых наиболее значимыми являются градиент и индукция магнитного поля.

1.5 Цели и задачи исследований

Целью диссертационной работы является разработка высокоградиентного магнитного сепаратора для очистки пластовой воды от нефтяных примесей с использованием дозированной концентрации нанодисперсного магнетита.

Основными задачами исследования являются

1. Анализ существующих конструктивных особенностей жидкостных магнитных сепараторов для сбора нефтепродуктов магнитными сорбентами.
2. Формирование комплекса методик для проведения исследований.
3. Моделирование технологических возможностей магнитного сепаратора с постоянной высокоэнергичной магнитной системой при магнитной сепарации эмульгированных частиц нефти с применением нанодисперсного магнетита.
4. Экспериментальные исследования эффективности высокоградиентного магнитного сепаратора для очистки пластовой воды от нефтезагрязнений.
5. Разработка методики создания высокоградиентного магнитного сепаратора с использованием нанодисперсного магнетита для очистки пластовой воды от нефтезагрязнений.

Выводы по главе

На основании библиографического анализа были сделаны следующие выводы.

1. Механические способы очистки пластовой воды от нефти (отстаивание, флотация, фильтро-сепарационное оборудование) в соответствии с ОСТ 39-225-88 предназначены для понижения нефтезагрязнений до 5–50 мг/л с размерами эмульгированных частиц 1–5 мкм. Однако достижение этих показателей осложняется эксплуатационными особенностями фильтрационных элементов и сепарационных устройств, спецификаций флотационных процессов или невозможностью настройки на нормативный режим очистки существующие резервуары-отстойники. В связи с этим поиск альтернативных способов и технических средств доочистки пластовых вод до допустимых концентраций при ППД является актуальным.

2. Одним из альтернативных методов очистки пластовых вод от эмульгированной нефти является использование наноразмерных ферромагнетиков, образующих в эмульгированных водных средах сольватные комплексы в виде омагниченных нефтяных глобул, извлекаемых из загрязненной среды с помощью магнитных сепараторов.

3. Этапы проектирования жидкостного высокоградиентного магнитного сепаратора для очистки пластовых вод от нефтезагрязнений с использованием нанодисперсных частиц должно предусматривать следующие технологические процессы:

- получение субстанции ферромагнетиков наноразмерного ряда;
- обеспечение высокоградиентного магнитного поля для извлечения омагниченных нефтесольватных частиц с магнитным моментом менее 10^{-14} Ам². из очищаемого потока пластовой воды путем направленного осаждения к источнику с большой интенсивностью поля;
- очистку источников магнетизма омагниченных нефтесольватных частиц с последующей регенерацией нанодисперсных коллоидных частиц для повторного использования;

4. Реализация этих требований к высокоградиентному магнитному сепаратору должна базироваться на результатах моделирования режимов работы с учетом выбора оптимальных параметров магнитной индукции, градиента магнитного поля, намагниченности магнетита, а так же магнитного момента очищаемой эмульсии, оптимальной концентрации нанодисперсного магнетита, размеров и геометрии магнитной системы.

5. Показано, что разработка научных и методологических основ проектирования высокоградиентного магнитного сепаратора для очистки пластовой воды от эмульгированных нефтепродуктов должна осуществляться на основе выявленного комплекса критериев эффективности, которые позволяют управлять основными параметрами процесса: расстоянием извлечения, градиентом и индукцией магнитного поля, размером магнитных частиц, их концентрацией в эмульгированной среде, наличием в ее составе активирующих ПАВ и временем сорбции магнитных частиц.

2. КОМПЛЕКС МЕТОДИК ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Методика отбора и хранения проб воды.

Общие требования к отбору проб воды приведены в государственных стандартах - ГОСТ 31861, ГОСТ 31862, ГОСТ 31953-2012 и ГОСТ 17.1.5.05-85 и государственном стандарте России 51592-2000. Для отбора и транспортировки проб воды, содержащей нефтепродукты, используются плотно закрытые стеклянные емкости коричневого цвета вместимостью от 0,25 до 1,0 литров. Предварительно такие емкости тщательно обрабатывают раствором моющего средства, ополаскивают дистиллированной водой и сушат в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 2 часов, после просушки повторно ополаскивают дистиллированной водой и повторно сушат. При отборе пробы емкость предварительно ополаскивают отбираемой водой.

В государственном стандарте ГОСТ 31953-2012 по отбору проб воды на содержание нефтепродуктов установлены требования. Пробы следует хранить в закрытой стеклянной емкости при комнатной температуре не более 8 ч. Если температура до 10 °С - не более 24 часов. Менее 4 суток при температуре до 5 °С. При более длительном хранении пробы требуется консервация концентрированной соляной или разбавленной 1:1 серной кислоты до $\text{pH} < 2$, ориентировочно 2 части кислоты на 1 часть пробы. Если высокая концентрация в пробе нефтепродуктов (сильный запах нефтепродуктов, появление пленки после отстаивания пробы) и необходимости хранения ее более 4 суток пробу дополнительно консервируют добавлением 10 мл применяемого при анализе экстрагента, после консервации пробу можно хранить при температуре до 5 °С в течение 1 месяца, при этом учитывают объем добавленного экстрагента. При высоком содержании нефтепродуктов, что характеризуется образованием на поверхности пробы воды пленки или слоя этих веществ, рекомендуется отбирать не более 0,25 л пробы, при более низком содержании нефтепродуктов - не менее 0,5 л пробы [17].

2.2 Определение концентрации нефти в воде

Общие требования к методам определения нефтепродуктов в природных и сточных водах определены в государственном стандарте ГОСТ 17.1.4.01-80. Существует несколько методов определения концентрации нефтепродуктов в воде: гравиметрический, флуориметрический (МУК 4.1.1262-03), ИК-спектрометрический (ГОСТ Р 51797- 2001), газохроматографический (ГОСТ 31953-2012).

Гравиметрический метод основан на экстракции нефтепродуктов из пробы и дальнейшем удалении экстракта путем выпаривания и взвешивания остатков. Нижний предел определения количества нефтепродуктов составляет 0,3 мг/л при анализе 3 - 5 литров.

Метод ИК-спектрометрический основан на извлечении нефтепродуктов из проб экстрагентом, хроматографической очистке экстракта и обнаружении углеводородов путем регистрации излучения инфракрасной области спектра (ИК) в диапазоне волновых чисел 2700—3200 см⁻¹. Диапазон измерений массовой концентрации нефтепродуктов в составе воды для ИК-спектрометрического метода 0.05-50 мг/л.

Газохроматографический метод основан на извлечении нефтепродуктов из пробы воды экстрагентом и очистке экстракта от полярных соединений сорбентом. После этого экстракт исследуют на газовом хроматографе, путем суммирования хроматографических пиков углеводородов, начиная с пиков C₁₀H₂₂, кончая пиком n-тетраконтана (C₄₀ H₈₂). Далее рассчитывают количественное содержание нефти в воде по установленной градуировочной зависимости. Диапазон измерений массовой концентрации нефтепродуктов в составе воды для газохроматографического метода 0.05-50 мг/л.

В настоящей работе концентрация нефти в воде определяется флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «ФЛЮОРАТ-02» по методике, описанной в методических указаниях МУК 4.1.1262-03 и методе М 01-05-2012. Флуориметрический метод измерений массовой концентрации нефти в воде основан на флуоресцентном анализе, то есть определении концентрации

нефтепродуктов по излучению возникающих в молекулах углеводородов. Для этого проводят извлечение нефтепродуктов из пробы гексаном [24]. Анализатор жидкости «ФЛЮОРАТ- 2» определяет концентрацию нефти на основе данных, из памяти анализатора (М 01-05-2012). Массовую концентрацию нефтепродуктов в составе воды прибор определяет в пределах 0.005-50 мг/л.

2.3 Методика определения магнитной индукции и градиента магнитного поля в магнитных устройствах

Электромагнитное поле – это вид материи, определяемый во всех точках двумя векторными величинами, которые характеризуют две его стороны, называемые соответственно электрическим полем и магнитным полем, и оказывающий силовое воздействие на заряженные частицы, зависящие от их скорости и заряда (ГОСТ 19880-74) [84].

В государственном стандарте ГОСТ 8.030-2013 изложены требования к средствам измерения магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента, градиента магнитной индукции.

Приборы для измерения магнитной индукции и напряженности магнитного поля называются магнитометрами, тесламетрами и гауссметрами. Бывают разные типы магнитометров:

- Магнитостатические магнитометры. Основаны на измерении механического момента, получаемого действием магнитного поля на индикатор прибора. Применяются главным образом для определения геомагнитного поля земли и намагниченности некоторых веществ.
- Индукционные магнитометры. Основаны на измерении ЭДС в измерительной катушке, возникающее при изменении проходящего через нее магнитного потока.
- Квантовые магнитометры. Принцип работы основан на ядерном магнитном резонансе (квантовых эффектах, возникающей при взаимодействии микрочастиц с магнитным полем).
- Гальваномагнитные магнитометры. Работа таких приборов основана на эффекте Холла (между гранями проводящих пластин возникает разность

потенциалов при одновременном воздействии электрических и магнитных полей) или на эффекте магнитосопротивления.

В настоящей работе измерения проводятся цифровым гауссметром AC/DC GM2 (рисунок 2.1). Предназначен для измерения переменного и постоянного магнитных полей.



Рисунок – 2.1 Гауссметр GM2

Магнитометр измеряет постоянное магнитное поле DC в трех диапазонах (таблица 2.1) и переменное магнитное поле AC в одном диапазоне от 1 до 10000 Гс, а также показывает направление поля.

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики[107]

Основные технические характеристики	Значение
Измеряемые диапазоны: DC поле 0,01 - 799,99 Гс 0,1 - 19 999,9 Гс 20 000 - 29 999 Гс AC поле 1 - 10 000 Гс	шаг 0,01 Гс 0,1 Гс 1 Гс 1 Гс
Температура окружающей среды: от 16 °C до 29 °C от -4 °C до 65 °C	Погрешность ± 1 % ± 2 %
Диапазон измерения: до 19 999,9 Гс более 20 000 Гс	Погрешность ± 1% ± 2%
Рабочая зона универсального, гибкого датчика Холла	1,1 x 1,5 x 4,3 мм

При оценке скорости очистки важным параметром является градиент магнитного поля. В работе [73] предложен способ определения градиента магнитного поля. Для этого в исследуемое магнитного поля помещают ферромагнитный материал и подводят к нему сверхвысокочастотные колебания и измеряют отношение уровней неоднородных резонансов к уровню однородных. Далее по известным расчетным формулам определяют неоднородность магнитного поля.

Для измерения градиента магнитного поля есть практика применения магнитометров с двумя датчиками Холла [9], э.д.с. которых включаются встречно, а сами они размещаются на расстоянии друг от друга. Небольшие размеры таких датчиков позволяют измерить изменение магнитной индукции и получить достаточно точную для исследования дискретную картину магнитного поля.

Некоторые частные задачи магнитостатики решаются только при помощи моделирования. Решение таких задач и общее понимание магнитостатики обосновано в уравнениях Максвелла. Эти уравнения связывают такие понятия, как магнитное поле, электрическое поле, электрический заряд и электрический ток. Основные уравнения Максвелла представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Уравнения Максвелла

Дифф. форма	Интег. форма	Пояснения к уравнениям	Пояснения к обозначениям
$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint_l E dl = -\int_s \frac{\partial B}{\partial t} ds$	Закон электромагнитной индукции Фарадея. Вихревое электрическое поле E создается изменяющимся во времени магнитным полем B .	E – напряженность электрического поля dl – векторный дифференциал длины пути l ds – дифференциальный векторный элемент поверхностной области S , направленный перпендикулярно к поверхности S . B – индукция магнитного поля
$\text{div} D = \rho$	$\oint_s D ds = q$	Теорема Гаусса. Источником электрического поля являются электрические заряды. Поток электрического поля через замкнутую поверхность S пропорционален величине свободного заряда.	D – электрическая индукция ρ – плотность электрического заряда q – заряд, охватываемый поверхностью S .
$\text{rot}H = \frac{\partial D}{\partial t} + \delta$	$\oint_l H dl = \int_s \delta ds + \int_s \frac{\partial D}{\partial t} ds$	Закон Ампера. Магнитное поле возбуждается током проводимости и изменяющимся во времени электрическим полем	δ – ток проводимости
$\text{div} B = 0$	$\oint_s B ds = 0$	Теорема Гаусса. Не существует магнитных зарядов (поле соленоидальное). Поток через любую замкнутую поверхность S равен нулю.	

Для скалярной функции градиент – это вектор, указывающий направление наиболее быстрого ее возрастания по абсолютному значению. Для случая трехмерного пространства, если напряженность магнитного поля представлена в виде скалярной функции $H(x,y,z)$, градиент напряженности вычисляется по формуле:

$$\text{grad}(H) = \frac{\partial H}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial H}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial H}{\partial z} \vec{k}. \quad (2.1)$$

В уравнения Максвелла было использовано понятие дивергенции вектора магнитной индукции $\text{div } B$. Дивергенция – это скалярная величина, которая определяет источники и стоки векторного или скалярного поля в некоторой точке этого поля [84]. Математически это скалярное произведение оператора набла (оператор Гамильтона) $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$ на скалярную функцию.

Дивергенция вектора магнитной индукции B , как определяет последний закон Максвелла, имеет вид:

$$\text{div} B = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0. \quad (2.2)$$

Если в некоторой точке $\text{div} K > 0$ (K -некоторый вектор), то эта точка является источником. Если $\text{div} K < 0$, то в этой точке линии вектора K сходятся, является стоком. Если $\text{div} K = 0$, то в данной точке отсутствует источник.

Вектор, характеризующий интенсивность вихревых полей в каждой точке, называется ротором. Ротор представляет собой вихрь, поэтому имеет ось. Направление этой оси определяет направление вектора, изображающего ротор. Ротор вектора магнитного потенциала A вычисляется:

$$\text{rot} B = \begin{pmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Постоянные и переменные электрические и магнитные поля являются примерами вихревых полей, роторы которых вычисляются по уравнениям

Максвелла. Вихревым принято называть поле, ротор которого не равняется нулю. Так для магнитного поля постоянного тока:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{\delta}. \quad (2.4)$$

То есть во всех точках области, где плотность тока $\vec{\delta} \neq 0$, там поле вектора \vec{H} является полем вихревым. Для расчёта вихревых магнитных полей используют векторный потенциал или вектор-потенциал магнитного поля и обозначается \vec{A} .

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A} \quad (2.5)$$

Векторный потенциал и плотность тока в произвольной точке поля связаны с помощью уравнения Пуассона [33]. Вернёмся к уравнению (2.4) и умножим его обе части на магнитную проницаемость среды μ :

$$\operatorname{rot} \mu \vec{H} = \mu \vec{\delta}. \quad (2.6)$$

Если μ постоянна, то её можно подвести под знак ротора.

$$\operatorname{rot} \mu \vec{H} = \operatorname{rot} \vec{B} = \mu \vec{\delta}. \quad (2.7)$$

Заменим \vec{B} на $\operatorname{rot} \vec{A}$, из этого получим:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{A} &= \mu \vec{\delta}, \\ \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{A} &= \left[\nabla \left[\vec{A} \right] \right] = \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{A} - \nabla^2 \vec{A} = \mu \vec{\delta}; \\ \operatorname{div} \vec{A} &= 0. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Введённое требование (2.8) означает, что линии вектора \vec{A} замкнуты сами на себя. С учётом этого получим следующее уравнение Пуассона:

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{\delta}. \quad (2.9)$$

В двумерном случае уравнение Пуассона принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -\Delta \quad (2.10)$$

В точках области, где плотность тока $\vec{\delta} = 0$, то и $\operatorname{rot} \vec{H} = 0$, тогда магнитное поле можно рассматривать как поле потенциальное, то есть поле, которое в каждой точке имеет скалярный магнитный потенциал φ_m . Следовательно, для таких областей можно принять:

$$\vec{H} = -\text{grad}\varphi_m. \quad (2.11)$$

Так как $\text{div}\vec{B} = \text{div}\mu\vec{H} = 0$, то при постоянной проницаемости магнитной среды $\mu = \text{const}$ $\text{div}\vec{H} = 0$.

В выражение $\text{div}\vec{H} = 0$, подставив вместо \vec{H} значение $(-\text{grad}\varphi_m)$, получим:

$$\text{divgrad}\varphi_m = 0. \quad (2.12)$$

Исходя из этого, скалярный потенциал магнитного поля может быть использован в областях, не занятых током, которые подчиняются уравнению Лапласа:

$$\nabla^2\varphi_m = \frac{\partial^2\varphi_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi_m}{\partial z^2} = 0 \quad (2.13)$$

Магнитные поля постоянного потока в области не занятых током могут быть исследованы аналитическими, численными, графическими и экспериментальными методами.

Аналитические методы анализа краевых задач магнитных полей предполагает решение дифференциальных уравнений в частных производных. При этом расчет проводится в той системе координат, которая близка к граничной поверхности. Характеристики аналитических методов анализа магнитного поля:

1) Основан на применении теоремы Гаусса. (Таблица 2.2) Закон полного тока в интегральной форме $\oint_s Dds = q$.

2) Основан на решении уравнений Пуассона и Лапласа. При заданных зарядах и токах задача сводится к интегрированию дифференциальных уравнений в частных производных и определения констант по граничным условиям. Получить решение для двумерных, а, особенно, для трехмерных полей нередко очень затруднительно;

3) Зеркальных изображений. Применим к определению поля ограниченных поверхностями простых форм. Однако исследовать сложные поверхности такими методами не удастся.

Среди рассмотренных методов анализа магнитного поля на практике наиболее часто используется дифференциальное уравнение в частных производных (уравнение Пуассона). Решение этого уравнения возможно только численными методами. При этом получается система алгебраических уравнений с большим количеством неизвестных. Для реализации численных методов осуществляют программирование на ЭВМ. Рассмотрим характеристики нескольких, наиболее закрепивших себя на практике, численных методов анализа полей.

Метод сеток. Позволяет получать решение нелинейных уравнений в частных производных из системы конечного порядка линейных алгебраических уравнений. Для этого исследуемую область разбивают сеткой. Для узлов сетки рассчитывают значения потенциалов. На первом этапе на сетку устанавливают начальную картину поля, задавая значения потенциалов в узлах сеточными функциями, находят потенциалы узлов сетки. Производные уравнения и краевые условия аппроксимируются разностными отношениями. Если при подсчете краевые условия и расчетные значения потенциалов не совпадают, то снова задаются потенциалы поля в узлах и снова вычисляются.

Также в работах [83, 106] приводится анализ двух фундаментально различных подходов расчета магнитных полей. Среди всех наибольшее применение получил **метод конечных элементов (МКЭ)**. Суть метода МКЭ в том, что область исследуемого поля разбивается на подобласти, называемые элементами. Элементы имеют общие узловые точки – точки соединения конечных элементов. Такие элементы в двумерной задаче чаще всего имеют форму треугольников.

Рассмотрим алгоритм решения уравнения Пуассона по методу конечных элементов. Этот метод наиболее часто применяется в современных программах. На рисунке 2.2 изображен элемент некоторой исследуемой области.

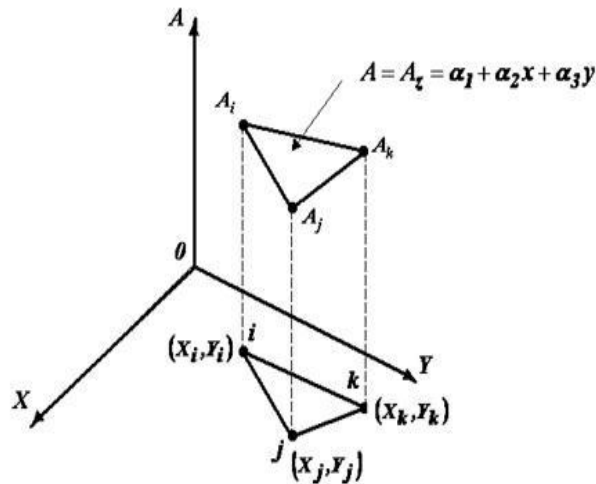


Рисунок 2.2 – Конечный элемент в исследуемой области

Конечный элемент, где функция A представлена в виде интерполяционного полинома, называется симплекс-элемент. На самом деле симплекс-элемент представляет из себя треугольник, который имеет прямолинейные стороны и три узла, которые являются вершинами. Нумерация вершин происходит против направления движения часовой стрелки. Первым выбирается произвольный узел i . Таким образом, обозначим для выбранного симплекс-элемента узловые значения величинами A_i, A_j, A_k , координаты которых соответственно есть $(x_i, y_i), (x_j, y_j), (x_k, y_k)$.

Треугольник является простейшей формой разбиения, это форма интерполяционного полинома первой степени:

$$A = A_z = a_1 + a_2 x + a_3 y, \quad (2.14)$$

где $A = A_i$ при $x = X_i$ и $y = Y_i$

$A = A_j$ при $x = X_j$ и $y = Y_j$

$A = A_k$ при $x = X_k$ и $y = Y_k$

Теперь приведённые условия подставим в интерполяционный полином первого порядка, что приведёт к системе уравнений:

$$\begin{cases} A_i = a_1 + a_2 X_i + a_3 Y_i \\ A_j = a_1 + a_2 X_j + a_3 Y_j \\ A_k = a_1 + a_2 X_k + a_3 Y_k \end{cases} \quad (2.15)$$

Положим:

$$\begin{vmatrix} 1 & X_i & Y_i \\ 1 & X_j & Y_j \\ 1 & X_k & Y_k \end{vmatrix} = 2S_a. \quad (2.16)$$

В результате коэффициенты составят:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{2S_a} \cdot [(X_j Y_k - X_k Y_j)A_i + (X_k Y_i - X_i Y_k)A_j + (X_i Y_j - X_j Y_i)A_k]; \\ a_2 &= \frac{1}{2S_a} \cdot [(Y_j - Y_k)A_i + (Y_k - Y_i)A_j + (Y_i - Y_k)A_k]; \\ a_3 &= \frac{1}{2S_a} \cdot [(X_k - X_j)A_i + (X_i - X_k)A_j + (X_j - X_i)A_k]. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Найденное значение коэффициентов подставляем, в уравнения интерполяционного полинома, то есть для каждого узла A_i, A_j, A_k . Теперь запишем выражение для искомой функции A , через три функции формы:

$$A = N_i A_i + N_j A_j + N_k A_k. \quad (2.18)$$

Определим значения N_i, N_j, N_k , (пробной функции), для каждой функции формы:

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{1}{2S_a} (a_i + b_i x + c_i y) \left\{ \begin{array}{l} a_i = X_j Y_k - X_k Y_j, \\ b_i = Y_j - Y_k, \\ c_i = X_k - X_j; \end{array} \right\}; \\ N_j &= \frac{1}{2S_a} (a_j + b_j x + c_j y) \left\{ \begin{array}{l} a_j = X_k Y_i - X_i Y_k, \\ b_j = Y_k - Y_i, \\ c_j = X_j - X_i; \end{array} \right\}; \\ N_k &= \frac{1}{2S_a} (a_k + b_k x + c_k y) \left\{ \begin{array}{l} a_k = X_i Y_j - X_j Y_i, \\ b_k = Y_i - Y_j, \\ c_k = X_j - X_i; \end{array} \right\}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Как говорилось ранее, замена краевой задачи вариационной заключается в разбиении расчётной области на конечные элементы и решение вариационной задачи внутри каждого элемента. Вследствие чего уравнение сводится к минимизации нелинейного энергетического функционала:

$$F = \int_S \left(\int_0^{B_x} \mathbf{v} \cdot B_x \cdot dB_x + \int_0^{B_y} \mathbf{v} \cdot B_y \cdot dB_y \right) \cdot dS - \int_S A_z \cdot \Delta \cdot dS. \quad (2.20)$$

Для каждого треугольника можно провести вычисление его вершин, где будет получено следующее выражение:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^{(a)}}{\partial A_i} &= \int_{S_a} \left[\frac{1}{\mu} \left(B_x \frac{\partial B_x}{\partial A_i} + B_y \frac{\partial B_y}{\partial A_i} \right) - J \frac{\partial A}{\partial A_i} \right] \cdot dS_a = \\ &= \left\{ \frac{1}{\mu} \left[\frac{c_i A_i + c_j A_j + c_k A_k}{2S_a} \cdot \left(\frac{c_i}{2S_a} \right) - \frac{b_i A_i + b_j A_j + b_k A_k}{2S_a} \cdot \left(-\frac{b_i}{2S_a} \right) \right] \right\} \cdot dS_a - \int_{S_a} J \frac{a_i + b_i x + c_i y}{2S_a} dS_a = \\ &= \frac{1}{4\mu S_a} \left[(c_i^2 + b_i^2) A_i + (c_i c_j + b_i b_j) A_j + (c_i c_k + b_i b_k) A_k \right] - J \frac{S_a}{3} = 0. \end{aligned}$$

Аналогичным способом будут вычисляться и другие вершины:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^{(a)}}{\partial A_j} &= \int_{S_a} J \frac{a_i + b_i x + c_i y}{2S_a} dS_a = \frac{1}{4\mu S_a} \left[(c_i c_j + b_i b_j) A_i + (c_j^2 + b_j^2) A_j + (c_j c_k + b_j b_k) A_k \right] - J \frac{S_a}{3} = 0 \\ \frac{\partial F^{(a)}}{\partial A_k} &= \int_{S_a} J \frac{a_i + b_i x + c_i y}{2S_a} dS_a = \frac{1}{4\mu S_a} \left[(c_i c_k + b_i b_k) A_i + (c_i c_k + b_i b_k) A_j + (c_k^2 + b_k^2) A_k \right] - J \frac{S_a}{3} = 0. \end{aligned}$$

На основе полученных выражений, которые можно записать для каждого треугольника области S образуется система нелинейных алгебраических уравнений. Решением этой системы уравнений является значение магнитного потенциала A_z в узлах треугольника. Если в кусочно-однородных областях магнитная проницаемость среды будет постоянной, тогда получим линейную систему уравнений.

Для решения магнитоэлектростатических задач по **методу граничных элементов (МГЭ)** применяются уравнения Максвелла в интегральной форме. Метод дает правильные результаты при решении линейных задач или близких к линейным. При решении нелинейных задач метод не используется.

На основе рассмотренных методов анализа составлено различное программное обеспечение, которое позволяет моделировать и решать магнитоэлектростатическую задачу. Большинство производителей применяют метод конечных элементов (МКЭ). Возможно, единственным исключением является компания Integrated Engineering Software, которая продвигает метод граничных

элементов (МГЭ). Такие известные программные продукты как, Maxwell EM, ANSYS, EMS, FLUX 2D и FLUX 3D, MagNet, Magneto, FEA, ELCUT и др., используют МКЭ.

Для расчета магнитных полей в диссертации использован программный продукт ELCUT® Студенческий 6.1.0. Возможности пользователя ограничиваются количеством элементов разбиения области. При решении узких задач возможности вполне достаточны. На рисунке 2.3 представлено окно программы.

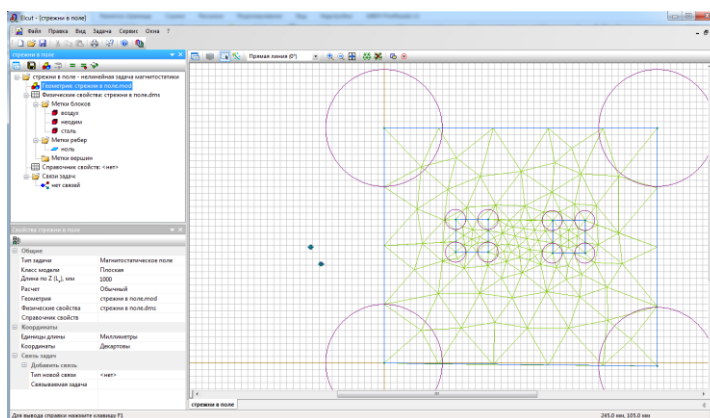


Рисунок 2.3 – Окно программы ELCUT® Студенческий 6.1.0

Окно разбито на две рабочие области. Справа задается геометрия объектов и названия материала, слева – свойства и характеристики. Кроме того, в нижней части находится строка состояния, а в верхней части панель инструментов. В работе [87] представлена развернутая инструкция пользователя пакетом ELCUT.

Современные численные методы решения задач и использующие эти методы САПР позволяют более тонко и детально изучать магнитную систему устройства.

2.4 Методика получения магнитных частиц магнетита и изучение его характеристик

2.4.1 Способы получения магнитных частиц

Ранее были рассмотрены различные ферромагнитные сорбенты предназначенные для сбора нефтепродуктов с поверхности воды, что отражено в ряде патентов [56, 59, 60, 62, 66, 67, 71, 72]. В настоящей работе в качестве

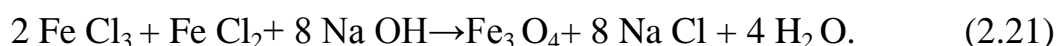
ферромагнитного сорбента предлагается использовать частицы магнетита нанодисперсных размеров.

В предыдущей главе был выполнен обзор работы [123], в которой была исследована активность неорганических твердых частиц меньше микрон на разделе фаз нефти и воды. Эти частицы сорбируются в пограничном слое воды и нефти, активно взаимодействуя с полярной частью асфальтеновых молекул, которая покрывает нефтяные капли. Использование нанодисперсного магнетита для очистки воды от нефтепродуктов является перспективным направлением в силу того, что такие частицы не надо гидрофобизировать. За счет большой поверхностной энергии и своего малого размера, частицы сорбируются граничным образом на разделе фаз нефти и воды.

Высокодисперсные частицы магнетита могут быть получены механическим способом (запатентован С. Пайпелом [115] в 1965 году). Магнетитовый порошок смешивался с поверхностно-активным веществом и жидкой основой (углеводородная среда). Дальше смесь поступает в шаровую мельницу, где происходит ее дробление в течение 500 - 1000 часов. После измельчения твердых частиц смесь подвергается центрофугированию, где отделяются крупные частицы, которые поступают обратно на мельницу, а мелкие, разбавляются в углеводородной среде до нужной концентрации. Таким способом получается магнитная жидкость, содержащая высокодисперсный магнетит в углеводородной среде.

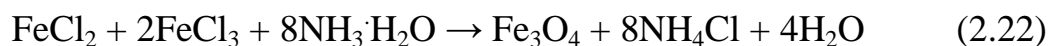
Усовершенствованием метода стало использование немагнитного вюстита на стадии механического диспергирования в мельнице [116], продолжительность измельчения которого намного меньше. После измельчения полученную смесь нагревали до температуры в диапазоне 200 – 570 °С. Это требуется, чтобы превратить немагнитную окись в ферромагнитную форму магнетита и железа. Использование FeO уменьшило процесс образования агрегатов, из-за отсутствия остаточной намагниченности, что сократило время получения коллоидных частиц.

Механические методы не получили широкого применения из-за невысокой производительности с одной стороны, и неоднородного состава с другой, из-за присутствия продуктов истирания в ходе измельчения. Высокодисперсные частицы магнетита для магнитной жидкости были получены химическим осаждением из растворов солей двух и трехвалентного хлорида железа в растворе гидроксида натрия [1]. Далее осадок стабилизируют в углеводородной среде с помощью пептизаторов, в качестве которых выступают ПАВ. Эта реакция осаждения магнетита впервые была получена В. С. Элмором в 1938 году [102]:



Растворы солей смешивали и добавляли к ним 10 % NaOH. Для ограничения роста частиц раствор интенсивно перемешивали. Из формулы реакции видно, что соли берутся из отношения 2:1. Это позволяет получить магнетит состава (31% FeO и 69% γ -Fe₂O₃).

Более мягкие условия для осаждения магнетита были получены Рене Массартом в 1981 г. [110]. Коллоидный магнетит был получен путем гидролиза смеси хлоридов железа (II) и (III) в соотношении минимум 1:2, с помощью раствора гидроксида аммония. Реакцию образования магнетита записывается так:

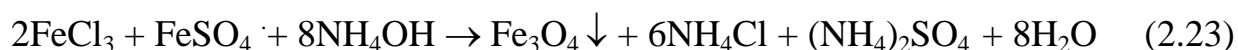


Далее частицы в водной среде стабилизировались двумя способами. Приготовление стабильных золей в щелочной среде происходило при помощи гидроксида тетраметиламмония, а в кислой – после воздействия разбавленным раствором хлорной кислоты [110]. Стабилизация в щелочной среде осуществлялась за счет электростатического отталкивания ионами OH, в кислой среде – ионами H₃O⁺.

В зависимости от области применения магнитных жидкостей (МЖ), способы их получения различны. Главной особенностью способа является выбор ферро-фазы, основы и стабилизатора, а также соотношения между его компонентами [6].

Эксперименты в настоящей работе проводятся с использованием магнетита, полученного путем механического измельчения (порошковый магнетит) и путем конденсации (нанодисперсный магнетит).

Для проведения исследования нанодисперсный магнетит изготавливался в лабораторных условиях (рисунок 2.4) по методике осаждения, представленной в работе Massart R. [110]. Под действием оснований раствора аммиака NH_4OH на раствор смеси солей 2-х и 3-х валентного железа в молярном соотношении 1:2, частицы магнетита выпадает в осадок:



Таким образом полученный коллоидный магнетит Fe_3O_4 имеет размеры в среднем 7 ± 2 нм. При абсолютной нейтрализации соли железа (III) процесс кристаллизации получаемого гидроксида железа будет зависеть главным образом от pH и температуры [95]. В работе [46] указывается, что изменение температуры и щелочной среды pH позволяет существенно изменять состав немагнитной фазы и размер коллоидов. К примеру, увеличение щелочной среды приводит к увеличению шариков и возникновению частиц α -оксида железа шарообразной формы. Наночастиц магнетита стабилизируются добавлением специального ПАВа, например, для углеводородного носителя в качестве ПАВ используется олеиновая кислота.



Рисунок 2.4 – Осажденный нанокодисперсный магнетит по реакции Massart

В экспериментах осажденный магнетит применялся без стабилизации. Частицы с заданными размерами обладают суперпарамагнитными свойствами [37]. Это означает, что коллоиды обладают большим магнитным моментом в

магнитном поле и размагничиваются без остаточной намагниченности. Образованные агрегаты частиц будут иметь меньшую энергию взаимодействия (межмолекулярное и магнитное взаимодействие), чем более крупные частицы. Таким образом, агрегаты, образованные суперпарамагнитными частицами, имеют более высокую степень дисперсности, и легче отслаиваются при взаимодействии с молекулами асфальтенов на поверхности капли нефти.

2.4.2 Методика определения размеров магнитных частиц

Как известно, основными методами исследования размеров частиц является статистическая обработка данных, полученных оптической, атомно-силовой или электронной микроскопией (прямой метод). Также для разделения полидисперсных систем и изучения их размеров применяют метод отстаивания (косвенный метод) под действием сил тяжести и выталкивающих сил. Такой процесс получил название седиментация. Суть метода [31] заключается в том, что частицы всплывают или осаждаются из-за разности плотностей фазы и среды, но для высокодисперсных частиц размерами 10^{-9} - 10^{-8} м его невозможно применить из-за седиментационной устойчивости.

Для исследования размеров частиц и агрегатов чаще всего применяют микроскопические методы. На сегодняшний день возможности микроскопов позволяют не только определять размеры исследуемого объекта, но также исследовать их структуру и строение [15].

Под размером частицы понимают ее диаметр. В самом простом случае, если есть возможность определить длину l , ширину b и высоту h , то диаметр вычисляется по формуле:

$$d_{cp} = \frac{h+l+b}{3}. \quad (2.24)$$

Затруднительность определения высоты, чаще всего приводит эту формулу к такому виду:

$$d_{cp} = \frac{h+l}{2}. \quad (2.25)$$

Еще одним вариантом определения размера частиц является нахождение среднего проектного диаметра по формуле:

$$d_{cp} = \sqrt{\frac{4S_{II}}{\pi}}, \quad (2.26)$$

где S_{II} – площадь поверхности шара.

Распространенным методом определения размеров частиц является определение статистической длины хорд. Существует несколько способов определения диаметра частицы при использовании хорд [18]:

- средний диаметр Фере (рис. 2.5, а) – длина проекции изображения частицы на прямую в заданном направлении d_F , измеряемая как расстояние между касательными к контуру изображения, проведенными параллельно выбранному направлению [18];
- диаметр Мартина (рис. 2.5, б) – длина хорды в заданном направлении d_M , делящая площадь проекции частицы на две равные части [18];
- наибольшая длина хорды в заданном направлении d_{\max} (рисунок 2.5, в);
- сопоставление изображения частицы с кругом, площадь которого примерно одинакова с площадью изображения частицы $d_{\text{ч}} = d_{\text{кр}}$ (рисунок 2.5, г) [18].

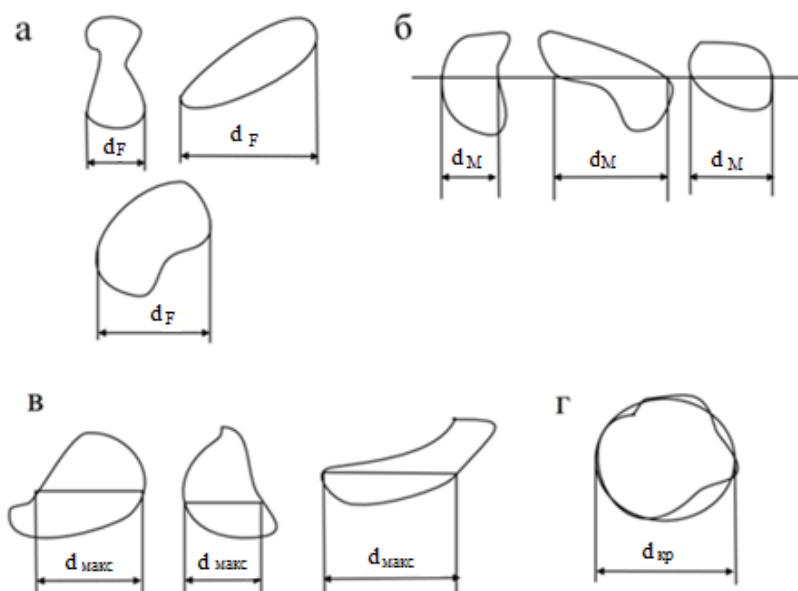


Рисунок 2.5 – Виды хорд [18]

Иногда используется понятие коэффициента сферичности ϕ – это отношение площади поверхности шара, равнообъемного частице, к площади поверхности исследуемой частицы. К примеру, такой коэффициент для сферичности для шарика равен 1, для куба 0,806 [18].

При подсчете количества частиц для оценки поверхностной площади пользуются средним значением в полидисперсной системе. Существуют несколько видов усреднения коэффициентов[15].

Среднечисленный диаметр в дисперсной системе вычисляют по формуле:

$$d_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_i d_i, \quad (2.27)$$

где n_i – количество частиц с i – ым диаметром d_i ; n - число частиц в системе.

Среднеповерхностный диаметр равен диаметру частиц в монодисперсной системе, при котором суммарная поверхность такая же, как и в полидисперсной системе:

$$d_n = \sum_i \frac{n_i d_i^2}{\sum_i n_i d_i^2} d_i, \quad (2.28)$$

где $\frac{n_i d_i^2}{\sum_i n_i d_i^2}$ - поверхностная доля i –ой фракции.

Среднемассовый (или среднеобъемный) диаметр соответствует диаметру частиц в монодисперсной системе, при котором суммарная масса (или объем) частиц такая же, как и в полидисперсной системе:

$$d_n = \sum_i \frac{n_i d_i^3}{\sum_i n_i d_i^3} d_i, \quad (2.29)$$

где $\frac{n_i d_i^3}{\sum_i n_i d_i^3}$ - массовая доля i –ой фракции.

Стандартное отклонение может быть определено на основе исходных данных и вычисленных средних d_n :

$$\sigma = \left(\sum_i \frac{n_i}{\sum_i n_i} (d_i - d_n)^2 \right)^{1/2}. \quad (2.30)$$

Кроме средней величины и среднего квадратического отклонения, в математической статистике существуют и другие инструменты для более

детального изучения размеров частиц. Размер частиц можно характеризовать как одномерную случайную величину, для которой можно найти функцию распределения и функцию плотности распределения. Эти функции позволяют найти процентное содержание частиц определенного размера или с определенной погрешностью в заданной полидисперсной системе. Способы изучения одномерной случайной величины описаны в работе [16].

Известно, что в процессе размалывания различных материалов, в том числе магнетита, размеры полученных гранул подчиняются логарифмически нормальному (логнормальному) закону распределения. Об этом впервые указал А. Н. Колмогоров [29]. При осаждении частиц магнетита путем конденсации по методу [110] также наблюдается полидисперсность системы. Построенные гистограммы и исследования в работах [97, 50, 46] свидетельствуют о том, что осажденный магнетит также имеет логнормальное распределение частиц по размерам. Таким образом, дисперсность полученного порошкового и высокодисперсного магнетита характеризуется интерполяцией по логнормальному закону.

Аналитическая функция плотности логнормального распределения определяется по формуле [28]:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{\ln x - a}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2\right), \quad (2.31)$$

где $x \geq 0$, a и σ – параметры распределения.

Из этого выражения следует, что нормально распределена не сама случайная величина x , а его логарифм. Поэтому математическое ожидание (выборочная средняя x) получит вид:

$$Mx = \exp\left(a + \frac{\sigma^2}{2}\right). \quad (2.32)$$

График плотности логнормального распределения асимметричен, мода которого равна $M_0 = \exp(a - \sigma^2)$. Рассеяние распределения относительно

математического ожидания (среднеквадратическое отклонение) принимает значение:

$$\sigma_x = \sqrt{(\exp(\sigma^2) - 1) \cdot \exp(2a + \sigma^2)}. \quad (2.33)$$

Вероятность P того, что случайная величина примет значение принадлежащее интервалу (x_1, x_2) составит:

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = F(x_2) - F(x_1). \quad (2.34)$$

Здесь F - функция распределения определяется выражением [23]:

$$F(x) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{(\ln x - a)}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right). \quad (2.35)$$

Для интерполирования функции распределения и функции плотности существует множество программ. В настоящей работе интерполирование проводилось в пакете Matlab R2013.

Кроме теоретических, существуют эмпирические формулы распределения, которые получаются на основе экспериментальных результатов. Одним из таких являются формула Годена и Розина-Раммлера [32]. Функция распределения Годена найдена на основе просеивания частицы через сито, различных классов крупности, имеет вид:

$$F(x) = 0.8 \left(\frac{d}{A} \right)^l, \quad (2.36)$$

где d - диаметр частиц; A, l - константы уравнения.

При дифференцировании получаем функцию плотности:

$$f(x) = 0.8 \cdot l \cdot \frac{1}{A^l} (d)^{l-1}. \quad (2.37)$$

В формуле Розина – Раммлера при рассмотрении распределения частиц по размерам в измельчаемых материалах применяют функцию распределения:

$$F(x) = 1 - \exp \cdot \left(\left(-\frac{d}{B} \right)^A \right), \quad (2.38)$$

где A и B – постоянные, определяемые в логарифмической форме этого уравнения по опытным данным.

Формула Годена, так и Розина–Раммлера, в основном хорошо описывают характеристики порошков, полученных измельчением с помощью определенного оборудования [32].

Как уже отмечалось, основным методом исследования размеров частиц является статистическая обработка данных, полученных оптической, атомно-силовой или электронной микроскопией.

Оптический или световой микроскоп обнаруживает предмет в видимом свете, используя для увеличения две ступени – объектив и окуляр. Объективы устройства как правило характеризуется номинальным увеличением от 2,5 до 120 раз. Лучшие микроскопы с хорошей апертурой увеличивают до 1800 и обладают разрешением не более 0,12 мкм [15].

Более совершенным устройством для исследования мелких объектов является электронный микроскоп. Отличается от обычного микроскопа тем, что источник света заменен источником электронов. Существует два типа электронных микроскопов: просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) и сканирующий электронный микроскоп (СЭМ).

ПЭМ это устройство для получения изображения путем пропускания электронной пушкой пучка электронов через ультратонкий образец (около 0,1 мкм). Основные части устройства: электронная пушка, конденсорные линзы, объективная линза и проекционная система, которая соответствует окуляру. В электронной пушке вольфрамовая нить испускает пучок электронов, которые ускоряются в электрическом поле. После чего узкий пучок проходит через магнитную линзу и увеличивается. Далее электронные лучи фокусируются объективной линзой или иным сенсорным прибором, формирующим первичное изображение. Устройство имеет вакуумную систему в области, где проходит пучок электронов. Биологические образцы следует обезвоживать. Увеличение в ПЭМ составляет от 100 до 1500000, что позволяет обнаружить частицы размерами 1 нм [15, 79].

У ПЭМ есть один большой недостаток, связанный с подготовкой образца тоньше 1 мкм. У сканирующего электронного микроскопа образец находится под углом, поэтому его поверхность можно исследовать с высоким разрешением (рисунок 2.6). В отличие от ПЭМ, сканирующая электронная микроскопия позволяет получить трехмерное изображение исследуемого объекта. Сфокусированный пучок электронов сканирует каждую точку поверхности образца, которая находится под углом к пучку, при этом датчики улавливают то, что вылет после ударов [15].

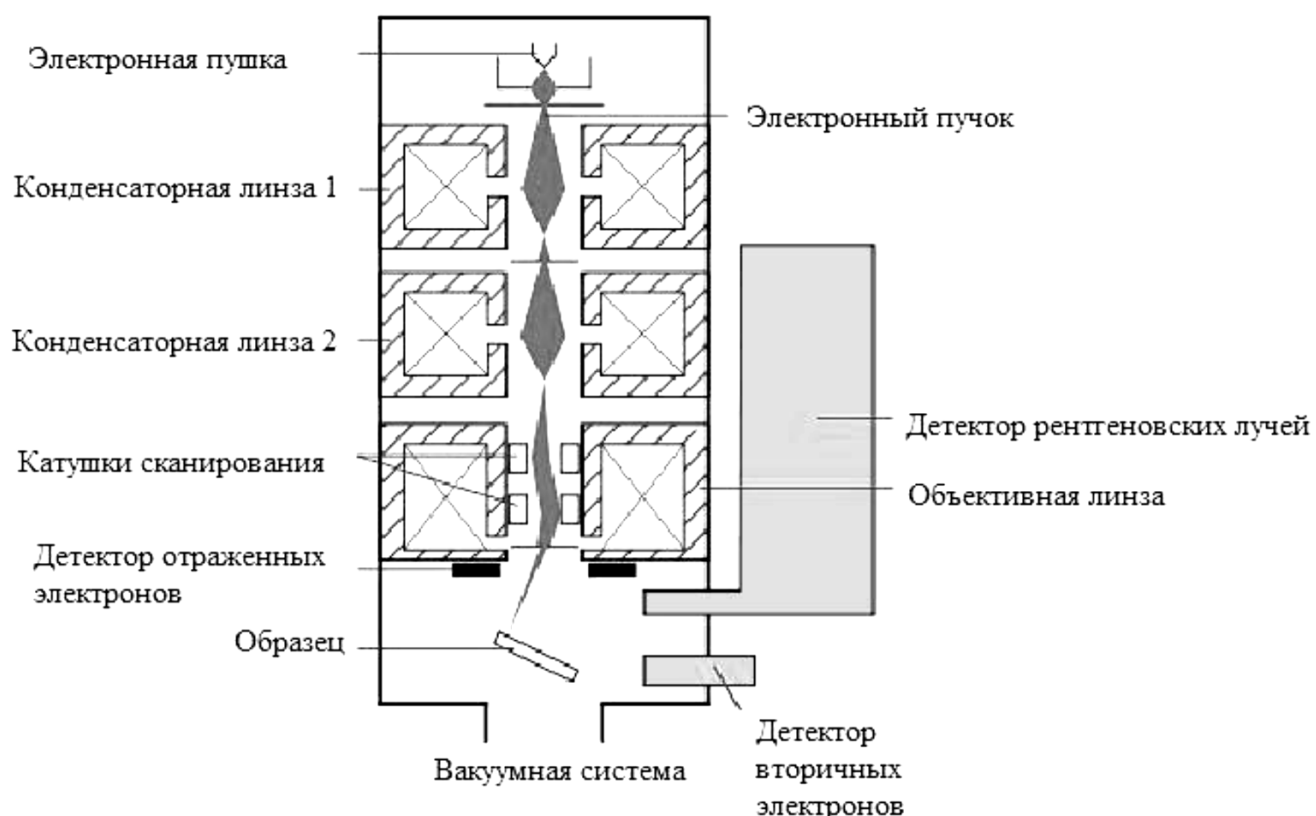


Рисунок 2.6 – Схема сканирующего электронного микроскопа [42]

Микроскопы типов СЭМ и ПЭМ позволяют проводить элементный анализ в исследуемом образце.

Для исследования распределения размеров частиц применялся оптический микроскоп LEVENHUK D70L (Рисунок 2.7) и сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega III SBU (рисунок 2.8).



Рисунок 2.7 – Оптический микроскоп LEVENHUKD70L



Рисунок 2.8 – Сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega III SBU

Чувствительность оптического микроскопа до 1 мкм. Этим устройством невозможно увидеть частицы нанометрового размера, но оценить размеры агрегатов, образующиеся нанодисперсными коллоидами, возможно. Основные технические характеристики приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Характеристики оптического микроскопа LEVENHUK D70L

Основные технические характеристики	Значение
оптическое увеличение	от 40 до 400 крат
цифровое увеличение	До 1600 крат
ЖК-монитор	3,6" (9,1 см) матрица Мпикс КМОП
Камера	2 Мпик
Встроенная подсветка	2 светодиода
Встроенные нижний и верхний осветители на светодиодах	да
Карта памяти microSD	2 ГБ
Адаптер питания от сети	питание 110-220 В, 50 Гц

Сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega III SBU (рисунок 2.8) позволяет проводить исследования методом энергодисперсионного анализа на микронном и субмикронном уровне с увеличением до 1000000х (таблица 2.4) и разрешением 3 нм.

Таблица 2.4 – Технические характеристики Tescan Vega III SBU

Разрешение (SE)	3 нм при 30 кВ 8 нм при 3 кВ
Увеличение	от 4,5 х до 1 000 000 (увеличение указано для изображения шириной 5 дюймов, непрерывное изменение увеличения)

2.4.3 Определение концентрации магнетита в составе жидкости

Общие требования к определению концентрации твердых частиц в составе жидкости определены государственными стандартами ГОСТ 27026-86, ГОСТ 1770-74 (ИСО 1042-83, ИСО 4788-80), ГОСТ 6709-72.

Общие требования проведения измерений регламентированы ГОСТ 27026-86 (Определение нелетучего остатка.) Объем испытуемого реактива устанавливают так, чтобы масса полученного нелетучего остатка была не менее 0,001 г. Навеску измеряют с точностью до 0,01 г. Объем жидкого испытуемого реактива измеряют цилиндром с точностью 1% . Выпаривание или нагревание до удаления летучих веществ проводят на водяной бане или с помощью инфракрасной лампы, если в нормативно-технической документации на испытуемый реактив нет других указаний. Далее нелетучий остаток высушивают в сушильном шкафу при температуре 105-110 °С и взвешивают до четвертого десятичного знака. Для контроля постоянства массы нелетучего остатка производят повторное высушивание в течение 1 ч. После чего охлаждают и взвешивают с точностью до 0,0002 г.

Массовую долю нелетучего остатка в процентах вычисляют по одной из формул:

$$X = \frac{m_1}{m} 100; \quad (2.39)$$

$$X = \frac{m_1}{\rho^{20}V} 100, \quad (2.40)$$

где m - масса навески испытуемого реактива, г;

m_1 - масса нелетучего остатка, г;

ρ - плотность испытуемого реактива, г/см³;

V - объем испытуемого реактива, см³.

За результат определения принимают среднеарифметическое значение двух параллельных определений, допускаемые расхождения между которыми не должны превышать значений, указанных в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Массовая доля нелетучего остатка, %	Допускаемое расхождение между параллельными определениями
До 0,01	30% от меньшего результата
От 0,01 до 0,1	20% от меньшего результата
От 0,1 до 1	10% от меньшего результата

При взвешивании использовались весы Shinko AJ-320CE (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 - Весы Shinko AJ-320CE

Основные технические характеристики представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 Основные технические характеристики весов Shinko AJ-320CE.

Основные технические характеристики	Значение
Наибольший предел взвешивания, г.	320
Наименьший предел взвешивания, г.	0,2
Цена деления, г.	0,001
Дополнительная единица измерения веса	Карат, фунт, унция, тройская унция, пеннивейт, тайл, тола, мом.
Диаметр платформы, мм.	118
Нижняя граница диапазона рабочих температур, °С	+10
Верхняя граница диапазона рабочих температур, °С	+30
Относительная влажность, %	Не более 80

2.5 Методика оценки эффективности работы магнитного сепаратора

Рассмотренные подходы омагничивания нефтепродуктов с применением различных ферромагнитных порошков и магнитных жидкостей, использовались для сбора нефтепродуктов с поверхности. Такие способы предназначены для сбора неэмульгированных и грубоэмульгированных нефтепродуктов и не испытывались с тонкоэмульгированными нефтепродуктами.

В этой работе рассматривается применение магнитных наночастиц и магнитного сепаратора для очистки пластовой воды от тонкоэмульгированных нефтепродуктов. Как уже говорилось ранее, частицы размерами меньше микрона, обладают повышенной активностью на границе раздела фаз, взаимодействуя с полярной частью молекул асфальтенов, находящихся на разделе фаз [123]. Известно, чем меньше размер частицы, тем большей поверхностной энергией она обладает, поэтому применение магнитных наночастиц для захвата капли нефти является многообещающим и до настоящего времени мало исследованным. При этом появляется новая задача по извлечению омагниченной капли со слабым магнитным моментом. Для разработки и дальнейшей оптимизации магнитного сепаратора, способного справиться с этой задачей, начнем с построения математической модели [91].

Формализацией процесса и системы – первый этап построения модели. Для начала опишем модель и выделим основные параметры системы.

Дозированная концентрация нанодисперсных частиц магнетита помещается в воду. В жидкой среде *седиментационная* устойчивость определяется силами тяжести и вязкого трения. *Агрегативная* устойчивость коллоидной монодисперсной системы магнитных частиц обеспечивается поверхностно-адсорбционными силами. Молекулы ПАВ способствуют стерическому отталкиванию частиц, что предотвращает сближение частиц на дистанцию, при которых энергия межмолекулярного и магнитного взаимодействия будет больше, чем разупорядочивающая энергия теплового движения. Магнитные наночастицы при интенсивном движения сталкиваются и осаждаются на поверхности эмульгированной частицы нефти, сорбируя асфальтены, находящиеся в пленке на

разделе двух сред [123]. Магнитные частицы с гидрофобными покрытиями, в отличие от гидрофильных, лучше взаимодействуют с пленкой нефти, но диспергированными такие частицы не могут находиться в воде (для сохранения дисперсности в воде и наночастицы должны быть гидрофильными), что исключает возможность взаимодействия высокодисперсных гидрофобных частиц с тонкоэмульгированными нефтями. Поэтому в этой работе частицы магнетита используются без ПАВ. Далее омагниченная капля извлекается с помощью магнитного устройства.

Таким образом, целью диссертационной работы является разработка методологических основ создания магнитного сепаратора для очистки пластовой воды от нефтяных примесей с использованием дозированной концентрации нанодисперсного магнетита. Проектирование магнитного сепаратора сопровождается оптимизацией и усовершенствованием исходного устройства (целевой функции) по определенным параметрам [10]. Таким образом, в качестве основной целевой функции F определим совершенствование магнитного сепаратора. Усовершенствование проводится по критериям *степени очистки воды от нефтепродуктов и скорости очистки с учетом экономической целесообразности*. Выделение из общей системы параметров и декомпозиция целей позволяет структурировать исследование и изучить объект на более низком уровне. На основе выполненного анализа литературы и построенной теоретической модели были выделены внутренние (управляемых) параметры системы:

1. Размер магнитных частиц (d_{ch} , мкм);
2. Индукция магнитного поля (B , Тл);
3. Градиент магнитного поля (dB/dx , Тл/м);
4. Концентрация ферромагнитных частиц (C , мг/л);
5. Расстояние извлечения омагниченной эмульсионной капли (L , м);
6. Время сорбции (T , ч);
7. Поверхностно-активное вещество на магнитной частице (P).

Конечно же, система является более сложной с неучтенными внешними неконтролируемыми параметрами, но процесс оптимизации допускает решение задач в закрытой системе. При этом не представляется возможным найти аналитическую зависимости между целевой функцией и его параметрами, поэтому задачи будут решаться, основываясь на декомпозицию объекта исследования. Оптимизацию устройства предлагается выполнять, опираясь на методы системного анализа, устанавливая влияние параметров на систему, по двум критериями эффективности:

$$F(d_{ч.м}, B, dB/dx, C, L, T, P) = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 \rightarrow \max, \quad (2.41)$$

где F_1 - повышение степени очистки; F_2 – повышение скорости очистки с учетом экономической целесообразности, за счет выбора оптимальных концентраций магнитных частиц.

Оценка целевой функции по первому критерию (качество очистки) осуществляется путем обработки полученных экспериментальных данных. По второму критерию эффективности степени очистки оценивается путем моделирования происходящих процессов. Под скоростью очистки следует понимать количество очищаемой до заданной кондиции воды в единицу времени.

Выводы по главе

Сформирован и обоснован комплекс методик, включающий:

- методику отбора, транспортировки, хранения проб вод;
- методику определения концентрации нефтепродуктов в воде флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «ФЛЮОРАТ-02».

- методику определения скорости очистки (производительности магнитного сепаратора). Выполняется на основе информации об индукции и градиенте магнитного поля. Исследование этих параметров проводится на основе аналитических методов, полученных в ходе измерений и аппроксимацией этих данных, и численных методов (МКЭ);

- методику получения высокодисперсного магнетита по реакции Массарта. Позволяет получить частицы магнетита размерами 5-10 нм. Использование

высокодисперсного и порошкового магнетита позволяет определить влияние размеров частиц на эффективность очистки;

- методику определения размеров агрегатов частиц. Основывается на статистической обработке данных, полученных микроскопией. Распределение размеров частиц магнетита, полученные конденсацией и измельчением, подчиняются логарифмически нормальному закону.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОГО МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОДИСПЕРСНОГО МАГНЕТИТА

3.1 Влияние параметров системы на режим работы магнитного сепаратора

3.1.1 Зависимость между магнитными свойствами частиц ферромагнетиков и их размерами

Магнетизм порождается только электрическим током. Для соленоида длины l и имеющий n витков, который несет ток I через проводник магнитного поля в катушке (имеем n/l витков на единицу длины и воздух или вакуум в его сердцевине) вдоль оси катушки создается магнитное поле $B = \mu_0 n I / l$. Здесь μ_0 – магнитная проницаемость вакуума ($1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$) Количество $n I / l$ является функцией геометрии катушки и тока, и обозначается эта величина $H (\text{А/м})$ (напряженность магнитного поля). Несущий ток проводник изменяет свое магнитное поле в различных средах и при перемене силы тока. Таким образом, любое тело под действием магнитного поля способно намагничиваться (приобретать магнитный момент). Введение намагничивающихся материалов в середину соленоида усиливает магнитное поле. Это происходит потому, что магнитное поле H создаваемое током катушки ориентируют (магнитные моменты молекул) M преимущественно в одном направлении. Магнитные поля молекулярных токов при этом компенсируют друг друга, создавая дополнительное поле, которое суммируется с H :

$$B = \mu_0 (M + H), \quad (3.1)$$

где $M = (m/V_m)$ вектор намагниченности тела, V_m объема тела.

Часто вектор намагниченности связывают с напряженностью магнитного поля: $M = \chi H$, где χ – магнитная восприимчивость вещества, зависящая от материала и температуры, является безразмерной величиной. Откуда магнитное поле внутри материала может быть представлено в виде:

$$B = \mu_0 (1 + \chi) H \quad (3.2)$$

Если принять $\mu = 1 + \chi$, то эта величина будет характеризоваться магнитной проницаемостью среды. Для парамагнитных материалов магнитная восприимчивость χ имеет положительное значение, а для диамагнитных принимает отрицательное значение. Для ферромагнитных материалов χ принимает большое положительное значение. Уравнение намагниченности для данных материалов является не только нелинейным, но и зависимым от истории намагничивания (проявление гистерезиса). Таким образом, простые отношения, такие как уравнение (3.1) и уравнение (3.2) не являются оправданными. В этом случае, намагничивание материала охарактеризовано магнитным циклом гистерезиса, как показано на рисунке 3.1. При повышении напряженности магнитного поля намагниченность увеличивается до определенного предела (кривая 1) M_s – намагниченность насыщения. При плавном уменьшении поля $H \rightarrow 0$, намагниченность M тела принимает значение M_r – остаточная намагниченность. Таким образом, для полного размагничивания вещества необходимо применить обратное поле (кривая 2) $H = H_c$, названная коэрцитивной силой. Обобщение проявлений магнитного гистерезиса рассмотрено в работах [74, 76].

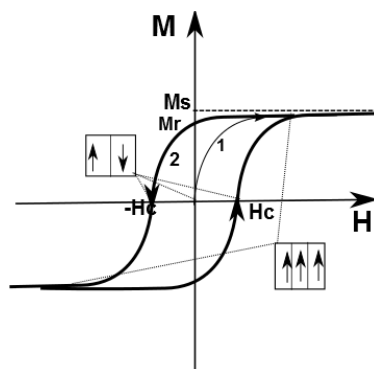


Рисунок 3.1 – Схематическое изображение петли гистерезиса у ферромагнетиков

Процессы намагничивания могут меняться при уменьшении размеров ферромагнитных частиц. Особенно полезной характеристикой является проявление суперпарамагнитных свойств для частиц nano размеров [22]. Последнее характеризуется тем, что частица не сохраняет намагниченности в отсутствие магнитного поля. Таким образом, при отключении внешнего

магнитное поля частицы вновь растворяются, что предотвращает образование конгломератов частиц, образованных за счет этой энергии магнитного взаимодействия

Теоретическому изучению магнитных свойств ферромагнитных частиц путем построения двумерных и трехмерных моделей посвящены работы [109, 120, 119, 103, 5]. Экспериментальные исследования, связанные с влиянием размера и кристаллографической анизотропии частиц на их магнитные свойства, представлены в работах [122, 99, 30, 5].

Режим работы магнитного сепаратора зависит от магнитного момента намагниченной глобулы нефти, который зависит от дисперсности ферромагнитных частиц. С одной стороны, мелкие дисперсные частицы лучше сорбируются на поверхности глобулы нефти за счет большой поверхностной площади по отношению к удельному весу. При этом у частицы нефти будет наблюдаться слабый магнитный момент. С другой стороны, более крупные частицы будут обладать меньшей активностью в пограничном слое. Чтобы определиться со степенью дисперсности частиц магнетита рассмотрим магнитные его магнитные свойства.

Известно [22], ферромагнетики имеют спонтанную намагниченность в отсутствие внешнего магнитного поля. При этом спины стараются ориентироваться в одинаковом направлении параллельно друг другу. При этом кусок ферромагнетика должен быть магнитно насыщенным, но, как мы знаем, намагниченность куска железа равна нулю. По разработанной теории П. Э. Вейсом, ферромагнетик разбивается на домены или области со спонтанной намагниченностью так, что суммарная намагниченность близка к нулю. Магнитный домен – это область вещества, в пределах которой все электронные спины атомов ориентированы в одном направлении и имеют одинаковый магнитный момент [22].

Для малых частиц ферромагнетиков с однородной намагниченностью Я. И. Френкель и Я. Г. Дорфман в 1930 ввели понятие однодоменной частицы. Для частиц с размерами в области однодоменности сохранение однородной

намагниченности энергетически более желательно, чем разбиение на домены. В этом случае частица подобно постоянному магниту, в котором векторы намагниченности всех составляющих его атомов одинаково направлены [121]. В 50-е годы Е. И. Кондорский изучил критерий абсолютной однодоменности [30]. Определил критический радиус R_c частицы, ниже которой наблюдается однодоменность ферромагнетика:

$$R_c = \frac{0.95}{M_s} (10A)^{1/2} \left(Q - \frac{2K}{M_s} - \frac{H}{M_s} \right)^{-1/2}, \quad (3.3)$$

где M_s – намагниченность насыщения (А/м); A – параметр обменной энергии; K – константа анизотропии; Q – размагничивающий фактор; H – напряженность поля. Отметим, что частица радиусом, удовлетворяющим уравнению (3.3), при всех значениях поля $H > -2K/M_s$ остается однодоменной. Как уже было сказано, условие абсолютной однодоменности:

$$R < R_c = \frac{0.95}{M_s} \left(\frac{10cB}{a_0 Q_R} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.4)$$

где $c = 1/2, 1$ и 2 для простой кубической, ОЦК (объемноцентрированная кубическая) и ГЦК (гранецентрированная кубическая) решеток соответственно; $B = z^2 A$ – параметр обменной энергии; z – число некомпенсированных спинов на атом; A – обменный интеграл; a_0 – параметр кристаллической решетки; Q_R – размагничивающий фактор однодоменного эллипсоида вдоль короткой оси. Подстановка численных значений в выражение (3.4) дает критический размер для однодоменных частиц. Для магнетита и маггемита предельный размер D_s составляет 128 и 166 нм соответственно [108]. На рисунке 3.2 приведена обобщенная зависимость, иллюстрирующая особенности магнитных свойств частиц от их размеров. Как видно из графика, по мере уменьшения диаметра наночастицы и достижения ею некоторого критического размера D_s , она переходит в однодоменное состояние. При этом магнитные моменты частицы, направленные вдоль одного и того же направления оси легкого намагничивания, характеризуют максимальное значение коэрцитивной силы поля.

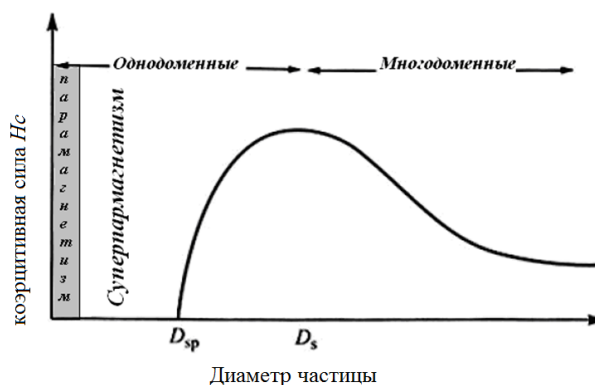


Рисунок 3.2 –Схематическая зависимость намагниченности частицы от размера [121]

Более мелкие однодоменные частицы также имеют однородную намагниченность. Магнитный момент частицы при этом может менять свое направление под воздействием температуры. При температурах, когда тепловая энергия становится сравнимой с внутренней энергией удерживающей ориентацию магнитного момента, внутри частицы начинают происходить тепловые флуктуации, при которых направление магнитных моментов не сохраняется. Намагниченность таких частиц стремится к нулю по закону:

$$M = M_s \exp(-t/\tau), \quad (3.5)$$

где t – время; τ – время релаксации. Такую форму магнетизма назвали суперпарамагнетизмом. Наступает она при размерах меньше критического диаметра D_{sp} (рисунок 3.2). Суперпарамагнитные частицы ведут подобно парамагнитным атомам, но имеют большой магнитный момент. В этом процессе энергия магнитной анизотропии $E=KV$ и тепловой энергии k_bT становятся равными. Как следствие, происходит флуктуация магнитных моментов и средний магнитный момент частицы стремится к нулю.

Французский физик Л. Неель в работах [112, 113] показал, возможность перехода в область суперпарамагнетизма величиной $\exp\left(-\frac{E}{k_bT}\right)$, из условия сравнения энергии магнитной анизотропии и тепловой энергии. Энергия магнитной анизотропии равна $E = KV$, где K – константа анизотропии и V – объем наночастицы. Ориентируясь на этот энергетический барьер, Уильям Браун

предложил выражений для оценки времени релаксации магнитных моментов [98]:

$$\tau_N = \tau_0 \sigma^{-2} \exp\left(\frac{E}{k_b T}\right), \quad \sigma = \left(\frac{KV}{k_b T}\right), \quad (3.6)$$

где τ_0 принимают постоянной, принимающей значения в диапазоне от 10^{-9} до 10^{-13} с [108]. Величина τ_0 связана со временем затухания угловой прецессии магнитного момента или, по-другому, ларморовой прецессии. Условием перехода в область суперпарамагнетизма считается $\sigma = 1$. С учетом того, что $K = 1,1 \cdot 10^4$ Дж/м³ – константа кристаллографической анизотропии магнетита, $k_b = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, можно сказать, что коллоидный магнетит диаметром $d \approx 10$ нм, полученный по реакции Массарта, тоже обладает суперпарамагнитными свойствами.

На рисунке 3.3 представлен расчет времени релаксации магнитных моментов для частиц магнетита различных размеров.

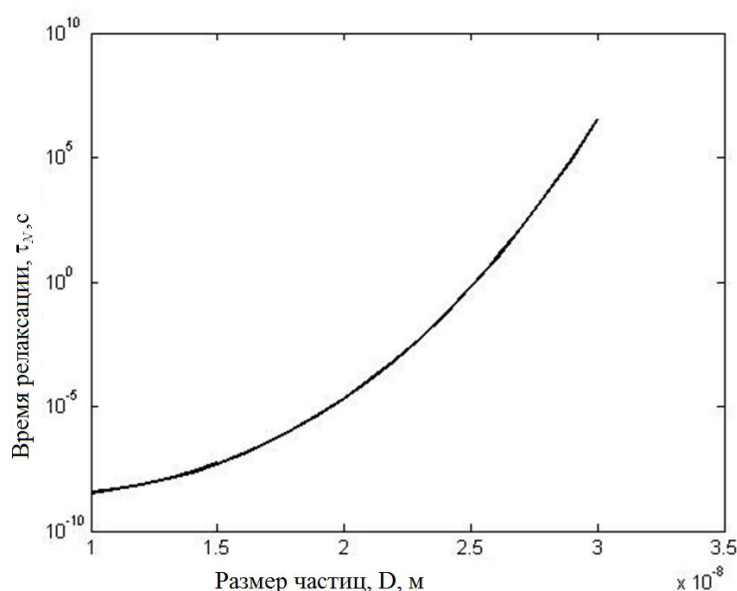


Рисунок 3.3 – Зависимость времени релаксации от размера наночастиц магнетита

Например, для частиц Fe₃O₄ размером 25 нм (таблица 3.1) при $T = 300$ К имеет время релаксации 0,59 с. Поэтому частицы с размерами меньше 25 нм, можно будет считать суперпарамагнитными.

Таблица 3.1 – Зависимость времени релаксации магнитных моментов от размера наночастиц магнетита

$D_{sp, нм}$	23	24	25	26	27
$\tau_N, с$	0.0054	0.051	0.59	8.31	147.12

В работе [100] для наночастиц маггемита $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ величина магнитного насыщения составила $3,17 \cdot 10^5$ А/м. При этом в работе [20] для наночастиц магнетита Fe_3O_4 намагниченность насыщения $\approx 4,7 \cdot 10^5$ А/м.

Как уже было сказано, благодаря флуктуации магнитных моментов суперпарамагнитные наночастицы быстро теряют свою намагниченность и намагничивание во внешнем поле происходит подобно молекулам парамагнитного газа. Главное отличие заключается в том, что намагниченность суперпарамагнетиков во много раз больше парамагнетиков. Таким образом, намагничивание системы суперпарамагнитных частиц в области насыщения может быть исследовано функцией П. Ланжевена. Без учета магнитного взаимодействия между монодисперсными коллоидными частицами, суммарная намагниченность совокупности суперпарамагнитных наночастиц зависит от объемной концентрации магнетита, напряженности внешнего магнитного поля, величины магнитного момента частицы, и тепловой энергии:

$$\frac{M}{\varphi_T M_{нас}} = \left[\text{cth}(\xi) - \frac{1}{\xi} \right], \quad (3.7)$$

где φ_T - объемная концентрация коллоидного магнетита в составе несущей среды, $M_{нас}$ - намагниченность насыщения, $\xi = \frac{\pi \mu_0 M_s H d^3}{6 k_b T}$ - аргумент Ланжевена для сферических частиц, H - напряженность магнитного поля, $k_b = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м - магнитная проницаемость вакуума.

На рисунке 3.4 представлены кривые намагничивания для наночастиц магнетита различных размеров, по закону Ланжевена.

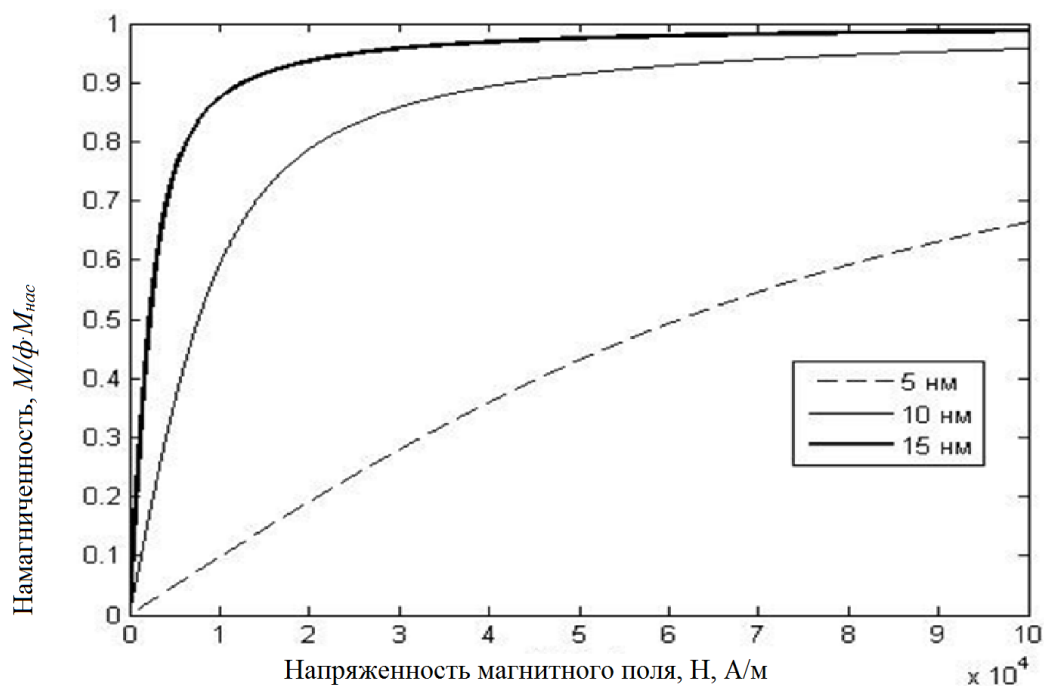
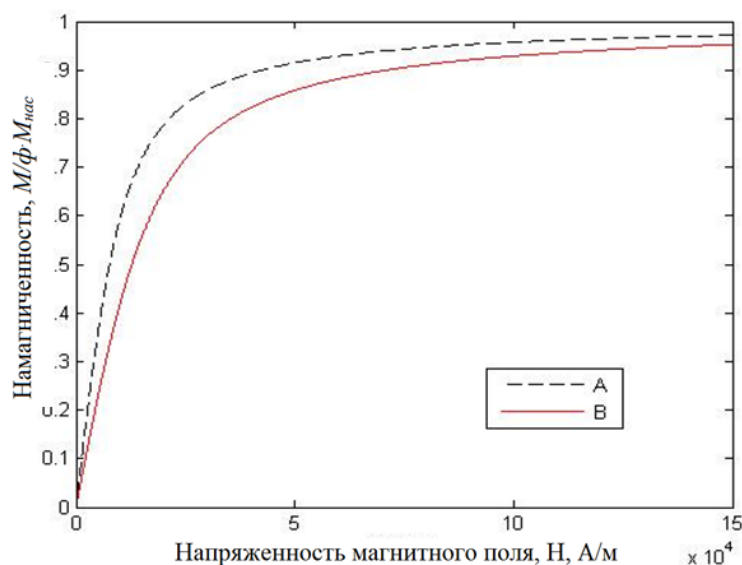


Рисунок 3.4 – Зависимость намагниченности наночастиц магнетита от напряженности H и диаметра частицы.

На рисунке 3.4 видно, что наночастицы магнетита диаметрами 15 нм становятся магнитно насыщенными при напряженности магнитного поля около 50 кА/м. В то же время с диаметром 10 нм магнитно насыщаются при значениях напряженности магнитного поля около 100 кА/м. Магнитный момент для частицы диаметром 10 нм составляет около 10^{-18} А·м². Наночастицы магнетита размерами 5 нм намагничиваются до насыщения только при напряженности 200-250 кА/м и имеют магнитный момент 10^{-20} А·м², что на два порядка меньше 10 нм частиц. Исходя из этого, частицы меньше 10 нм в работе рассматриваться не будут.

Магнитные свойства так же зависят от температуры. Было показано (формула 3.6), что время флуктуаций магнитного момента частицы экспоненциально меняется с температурой. Наночастиц магнетита приобретают ферромагнитные свойства при охлаждении ниже температуры блокировки T_b . Лабораторные испытания в работе [20] показали, что наночастицы γ -Fe₂O₃ такой температурой является $T_b \sim 100$ К, наночастиц магнетита Fe₃O₄, при $T_b = 140^0$ К. Верхней границей суперпарамагнетизма для наночастиц маггемита и магнетита является температура $T_N \sim 770^0$ К. При более высокой температуре наночастицы

приобретают антиферромагнитные свойства. На рисунке 3.5 показаны графики намагниченности магнетита ($d=10$ нм) при температуре 300 К и 500 К.



A – кривая намагничивания при 300К, B – кривая намагничивания при 500К

Рисунок 3.5 – Влияние температуры на намагниченность наночастиц магнетита.

Таким образом, при повышении температуры магнитные свойства наночастиц незначительно снижаются. Температура, при которой наночастицы магнетита сохраняют суперпарамагнитные свойства, соответствует эксплуатационным условиям. Можно считать, что суперпарамагнитными свойствами обладают частицы магнетита с диаметром меньше 25 нм. Эти наноразмерные частицы обладают намагниченностью $\approx 4,7 \cdot 10^5$ А/м и магнитным моментом 10^{-18} А·м². Магнитное насыщение происходит при напряженности магнитного поля 100 кА/м, что позволяет управлять их движением с помощью внешнего магнитного поля.

3.1.2 Моделирование процессов в коллоидной системе магнитных частиц

3.1.2.1 Силы на магнитной частице

При манипуляции магнитной частицей, находящейся во взвешенном состоянии в жидкости, необходимо учитывать различные силы: магнитную, гравитационную, вязкого трения, броуновского движения, инерции.

Для расчета воздействия магнитной силы на намагниченную частицу, последняя заменена диполем точки с моментом m . Так для магнитной частицы, находящейся в неоднородном магнитном поле, можно найти действующую силу:

$$F_m = m \cdot \nabla B, \quad (3.8)$$

где ∇B – градиент индукции магнитного поля.

В уравнении 3.8 важную роль играет градиент, за счет которой притягивается магнитная частица в область с более высокой величиной магнитного поля.

При движении магнитной частицы в жидкой среде под воздействием магнитных, гравитационных и иных сил, она претерпевает помеху гидродинамической силы. Джорджем Стоксом была получена сила трения для сферической частицы при небольших числах Рейнольдса:

$$F_c = 3\pi\eta v d \quad (3.9)$$

Здесь F_c – сила вязкого трения, v – скорость частицы в жидкости, η – коэффициент вязкости. Число Рейнольдса (Re), – является безразмерной величиной и определяется как отношение инерционных сил к вязким:

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}, \quad (3.10)$$

Здесь ρ – плотность среды, v – скорость течения, d – гидравлический диаметр. Для каждого вида течения существует критическое число $Re_{кр}$, которым принято определять переход от ламинарного (слоевого) течения к турбулентному (вихревому). При $Re < Re_{кр}$ внутри системы протекает ламинарное течение, если $Re > Re_{кр}$ есть риск возникновения турбулентности. При небольших скоростях не учитываются силы инерции из-за того, что сила инерции пропорциональна квадрату скорости, а сила вязкости – первой степени скорости. Случай течения, когда скорость, а, соответственно, число Рейнольдса малы, называется *ползущим движением*. Решение уравнения Навье-Стокса (формула 3.9) получено при условиях ползучего движения. В работе [96] более подробно приведены результаты получения сопротивления на сфере. Одна треть этого сопротивления возникает вследствие разностей давления, а две трети – вследствие сил трения.

При этом формула 3.9 сравнивалась с экспериментальными данными и оказалась верна только при $Re < 1$. Для частиц микро и нано размеров число Re будет составлять на порядок меньшую величину, чем турбулентность образованная внутри течения жидкости в канале. Таким образом, если процесс очистки при помощи магнитных частиц будет происходить при динамической очистке, то при проектировании магнитного сепаратора необходимо будет определять риски возникновения турбулентности. Например, течение жидкости в прямой трубе с гладкими стенками $Re_{кр} = 2100 - 2300$. Будем считать эти значения критерием ламинарного течения жидкости в рабочей области магнитного сепаратора.

Уравновешивание силы сопротивления и магнитной силы (3.8, 3.9) магнитной частицы определяют ее скорость движения. Кроме магнитных и вязких сил на частицы воздействуют гравитационные и выталкивающие силы.

3.1.2.2 Седиментационная устойчивость частиц магнетита в воде

Седиментационная устойчивость – это устойчивость коллоидной системы частиц в жидкости к осаждению за счет теплового броуновского движения. Такое свойство важно рассмотреть с той целью, чтобы выяснить как долго будут частицы находиться в взвешенном состоянии в резервуаре во время рабочего цикла. Седиментационная устойчивость выполняется при условии, что скорость осаждения частиц под действием сил тяжести не должна превышать скорости теплового движения этих частиц в несущей жидкости [86].

На частицу в воде действуют противоположно направленные силы тяжести и выталкивания. Из условия разности плотностей частица будет всплывать или осаждаться:

$$F_g = (\rho_a - \rho_l)g \frac{\pi d^3}{6}, \quad (3.11)$$

где ρ_a – плотность твердой частицы, ρ_l – плотность жидкости, в которой частица находится.

Если плотность жидкости ρ_l больше плотности частицы ρ_a , то сила принимает отрицательное направление, а сама частица всплывает. В ином случае осаждается. В нашем случае магнетит имеет плотность больше плотности воды,

поэтому частицы будут осаждаться. Процессу осаждения частицы магнетита противодействует сила вязкого трения F_c (формула 3.9). С учетом уравнивания двух сил F_c и F_g , находим скорость осаждения частицы:

$$V_{gr} = \frac{(\rho_a - \rho_l)gd^2}{18\eta}. \quad (3.12)$$

При оседании частицы магнетита создают седиментационный поток, который равен числу частиц n , прошедших в единицу времени единичную площадку: $j_d = V_{gr}n$.

В результате образуется градиент концентрации, описанный законом Фика, обратного диффузионного потока:

$$j_d = -D \frac{dn}{dh}. \quad (3.13)$$

В результате равенства двух потоков устанавливается диффузионно-седиментационное равновесие:

$$V_{gr}n = -D \frac{dn}{dh}, \quad (3.14)$$

где $D = \frac{k_b T}{3\pi\eta d}$ - коэффициент поступательной диффузии для сферических частиц. Равенство 3.14 характеризует термодинамическую седиментационную устойчивость коллоидной системы. Решив уравнения 3.14, получим зависимость частичной концентрации от высоты емкости h :

$$n = n_0 e^{-\frac{V_{gr}h}{D}} = n_0 \exp \left[-\frac{(\rho_a - \rho_l)g \frac{\pi d^3}{6} h}{k_b T} \right]. \quad (3.15)$$

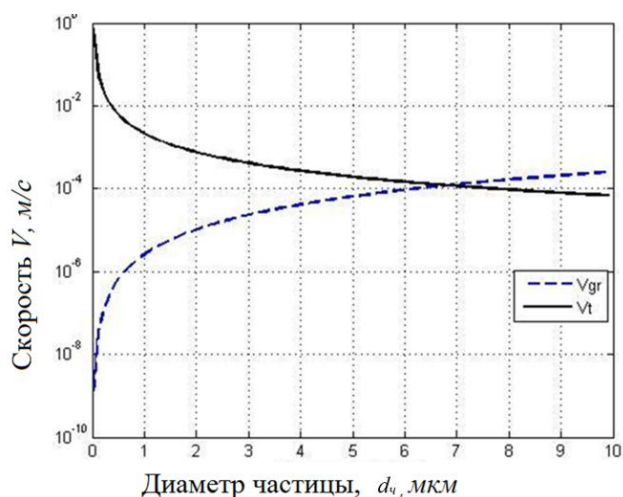
Известна формула скорости теплового движения частицы массой m :

$$V_t = \sqrt{\frac{3k_b T}{m}}, \quad (3.16)$$

Рассмотрим седиментационную устойчивость коллоидной системы частиц магнетита. Для этого примем: $\rho_a = 5200 \text{ кг/м}^3$, $\rho_l = 1000 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость воды $\eta = 8.9 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $T = 300^0 \text{ К}$, $k_b = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/}^0 \text{ К}$. С учетом выбранных значений получим следующие значения величин для частицы

магнетита с диаметром $d=20$ нм: коэффициент диффузии $D=2.47 \cdot 10^{-11}$ м²/с, средняя скорость осаждения $V_{gr}=10.28 \cdot 10^{-10}$ м/с, скорость среднего теплового движения таких частиц в воде $V_t=0.75$ м/с [39]. Скорость теплового движения значительно больше скорости осаждения, поэтому рассматриваемая монодисперсная система седиментационно устойчива.

На рисунке 3.6 приведены результаты моделирования скоростей частиц разных диаметров в воде.



V_{gr} – скорость гравитационного оседания, V_t – скорость теплового движения
 Рисунок 3.6 – Зависимость скоростей частиц магнетита в воде от их размеров [39]

Как уже было сказано, частицы начнут осаждаться, если скорость гравитационного оседания превысит скорость теплового движения. Для магнетита система седиментационно устойчива в воде при диаметрах меньше 7 мкм. Таким образом, нанодисперсный магнетит в воде будет седиментационно устойчивым, а, следовательно, такой сорбент будет иметь более высокую вероятность адсорбции на диспергированной в воде нефтяной эмульсии.

3.1.2.3 Агрегативная устойчивость магнитного коллоида в жидкой среде

Агрегативная устойчивость – это способность коллоидной системы частиц сохранять дисперсность, размеры частиц и самостоятельность. Частицы без покрытия поверхностно-активным веществом ПАВ чаще всего подвержены образованию агрегатов (процессу слипания твердых частиц) под действием вандер-ваальсовых сил. В результате нарушений агрегативной устойчивости

происходит коагуляция частиц, которые перестают участвовать в броуновском движении. Таким образом, агрегаты будут подвергаться осаждению и вероятность прилипнуть на поверхности эмульсии снижается. Агрегативная устойчивость коллоидной системы наночастиц обеспечивается ПАВ. Молекулы ПАВ обеспечивают стерическое отталкивание, что удерживает приближение коллоидов магнетита на такую дистанцию, при котором энергия притяжения будет больше, чем энергия теплового движения [86].

Сила Ван-дер-Ваальса или сила межмолекулярного притяжения с увеличением расстояния l между центрами частиц уменьшается пропорционально l^{-6} при соразмерных диаметру расстояниях и имеет три составляющие силы взаимодействия. Такими составляющими являются ориентационное взаимодействие и индукционное взаимодействие, возникающее между полярными и неполярными молекулами соответственно. И третьей, самой главной, составляющей является сила дисперсионного взаимодействия, учитывающая силы электростатического притяжения и индуцированного (сил неполярных молекул). Дисперсионные силы были объяснены Фрицем Лондоном. Хуго Кристиан Гамакер развил теорию Лондона и предложил выражение для энергии взаимодействия двух коллоидов одинакового диаметра d в виде:

$$E_v = -\frac{A}{6} \left(\frac{2}{(L^2 + 4L)} + \frac{2}{(L+2)^2} \ln \left(\frac{L^2 + 4L}{(L+2)^2} \right) \right), \quad (3.17)$$

где $L=2s/d_c$; s – дистанция между коллоидами; A – постоянная межмолекулярных сил взаимодействия Гамакера.

По формуле (3.17) при сближении частиц на близкое расстояние значение параметра L уменьшается, а энергия взаимодействия E_v имеет резкий скачок. Происходит слипание частиц.

Дополнительно к энергии межмолекулярного взаимодействия добавляется сила магнитного взаимодействия, если частицы находятся в магнитном поле. При этом энергия притяжения двух точечных диполей равна [86]:

$$E_m = -\frac{\pi M_s^2 \mu_0}{9} \frac{d_{ch}^3}{(L+2)^2}, \quad (3.18)$$

где M_s – намагниченность насыщения; $\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}\text{Гн/м}$ – магнитная проницаемость вакуума. Таким образом, чтобы не происходило слипания частиц, находящихся в магнитном поле, сумма двух величин E_v и E_m должны быть меньше разупорядочивающего теплового движения k_bT .

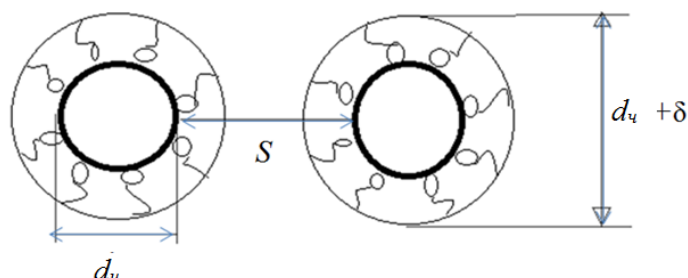


Рисунок 3.7 – Магнитные наночастицы с адсорбционным слоем

Рассмотрим следующую модель. Магнитные наночастицы оксида железа Fe_3O_4 с диаметром d_c и адсорбирующим слоем толщиной δ находятся в несущей жидкости (рисунок 3.7). Минимальное расстояние, на котором могут находиться частицы это 2δ . Расчеты проводились при следующих значениях: $A=10^{-19}$ Дж; $T=300\text{K}$; $10\text{ нм} \leq d_c \leq 20\text{ нм}$; $1\text{ нм} \leq \delta \leq 4\text{ нм}$.

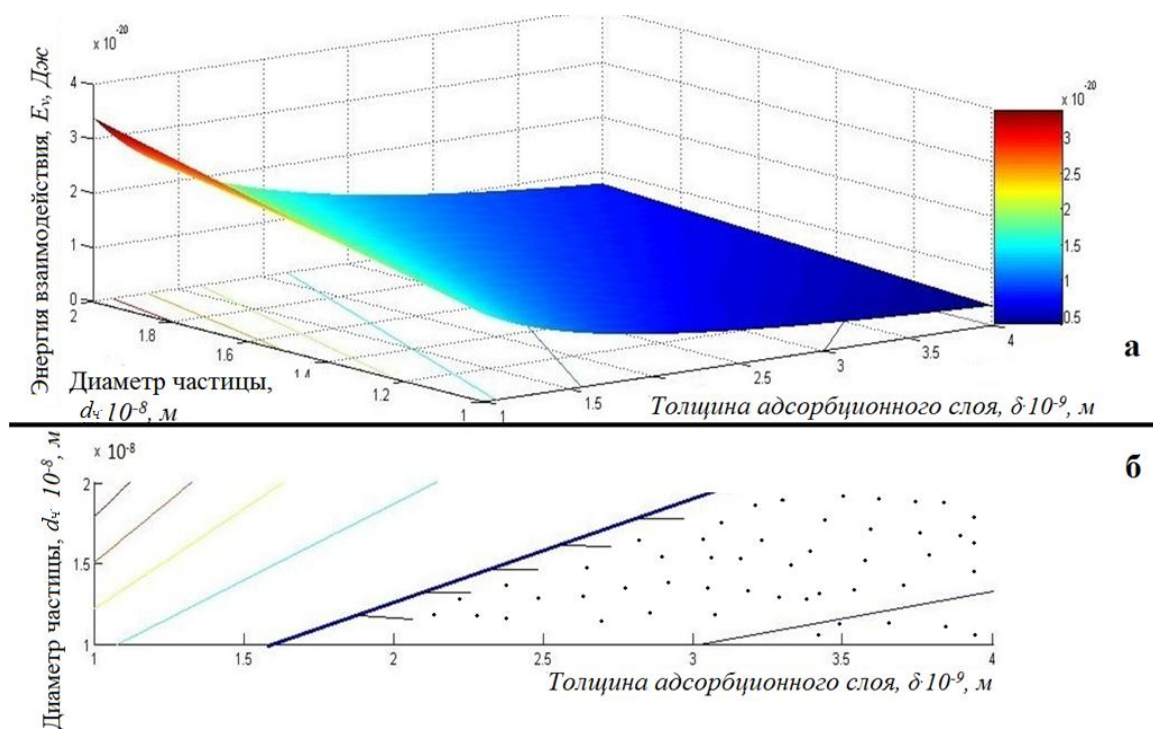


Рисунок 3.8 – Зависимость энергии взаимодействия от размеров магнитной наночастицы и толщины ПАВ: а – трехмерное изображение, б – линии уровня

Моделирование показало, что при увеличении размера частицы дипольное притяжение возрастает, поэтому для предотвращения слипания частиц толщина адсорбционного слоя тоже должна быть увеличена. На рисунке 3.8 в нижней части изображены проекции линий уровня поверхности на нижнюю плоскость. Значения энергии взаимодействия частиц по этим линиям равны. Учитывая то, что при заданных условиях энергия разупорядочивающего теплового движения $k_b T = 4.14 \cdot 10^{-21}$ Дж, можно определить множество (полуплоскость), в котором частицы будут агрегативно устойчивыми (рисунок 3.8). Для частиц с размерами менее 10 нм энергии взаимодействия между частицами и разупорядочивающего теплового движения становятся практически равными, а, следовательно, процесс образования агрегатов можно считать обратимым.

Наиболее распространенными поверхностно-активными веществами при изготовлении магнитных жидкостей на основе керосина является олеиновая кислота, длина молекулы которой составляет около 2 нм [86]. Максимальный размер частиц Fe_3O_4 , покрытых мономолекулярным слоем олеиновой кислоты с $\delta = 2$ нм составит около 12 - 13 нм. Учитывая заданные параметры, получается идеальная магнитную жидкость, которая будет обладать хорошими магнитными характеристиками. При этом, если чрезмерно увеличивать толщину адсорбционного слоя, то это приведет к уменьшению объемного содержания магнитного материала и ограничит верхнюю границу намагниченности жидкости.

Несмотря на использование различных ПАВ, в магнитных жидкостях происходит расслоение. Экспериментально наблюдалось такое явление в работе [8]. Дисперсная фаза представлена большим количеством сферических капель. Автором в работе [105] был оценен средний размер образовавшихся агрегатов. Такие капельные агрегаты имеют размеры на два порядка выше, чем коллоиды и принимали значение около 1 мкм. В другой работе [117] был выполнен седиментационный анализ агрегатов помещенных в магнитное поле. Размеры капель составили 5-20 мкм. При этом агрегация была обратимой, и понижение напряженности магнитного поля способствовало растворению капель.

В настоящей работе не рассматривалась задача стабилизации высокодисперсных магнетитовых частиц размерами 10 нм из-за соразмерности энергий дипольного взаимодействия и теплового движения. Для получения коллоидной системы твердых высокодисперсных частиц в воде использовались различные стабилизаторы [6, 114, 111]. Использование каких либо стабилизаторов только ухудшит взаимодействие частиц с поверхностью эмульсии. Для сорбции твердых частиц на поверхности эмульсии, поверхность их должна частично смачиваться как водой, так и нефтью [49]. При этом энергия закрепления частиц равна изменению энергии Гиббса возникающей при переходе с пограничного слоя нефти и воды в объемную фазу, прямо пропорциональна радиусу твердой частицы и углу смачивания [107].

При численном решении задач по очистке воды от эмульсий нефти при помощи высокодисперсных магнитных частиц магнетита необходимо оценить упаковку магнитных наночастиц на поверхности эмульсий. Твердые частицы, сорбируясь на поверхности эмульсии, могут образовать, как монослой, так и формировать разные структурные агрегаты, в которой участвуют так же и межфазовые слои [48]. Это все зависит от многих факторов, но образовавшийся агрегат целиком уже закрепляется на эмульсии, сохраняя взаимодействие между частицами [49]. Очевидно, слой из цельных агрегатов будет составлять упаковку на поверхности эмульсии. Будем учитывать этот факт при составлении модели.

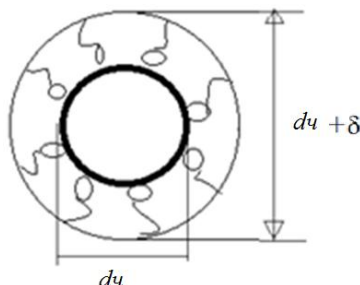
3.1.3 Моделирование извлечения капли нефти

3.1.3.1 Моделирование движения омагниченной нефти в неоднородном магнитном поле

Ранее были рассмотрены способы очистки воды от нефтепродуктов с использованием магнитной жидкости. По известным выкладкам Фертмана [86] для оценки возможности извлечения омагниченной эмульсии рассмотрим модель движения омагниченной капли в поле неодимового магнита.

Рассмотрим следующую модель. Сферические магнитные наночастицы магнетита диаметром d_c покрыты монослоем олеиновой кислоты толщиной δ и

находятся в керосине (рисунок 3.9). Чтобы изучить возможность извлечения нефтяных эмульсий из воды, рассчитаем долю магнитных частиц в углеводородной глобуле и его намагниченность. Узнав намагниченность и объем, можем рассчитать скорость движения в неоднородном магнитном поле.



d_{ch} – диаметр наночастицы магнетита, δ – толщина адсорбирующего слоя
Рисунок 3.9 – Схематическое изображение наночастицы, покрытой адсорбционным слоем

Объем коллоида магнитной наночастицы диаметром d_{ch} :

$$V_m = \frac{\pi d_q^3}{6}. \quad (3.19)$$

Для предотвращения образования агрегатов наночастицу покрывают адсорбционным слоем толщиной δ . Длинноцепочечная хвостовая часть молекулы ПАВ способствует стерическому отталкиванию, что предотвращает слипание. Объем такой наночастицы вычисляем по формуле:

$$V_n = \frac{\pi(d_q + 2\delta)^3}{6}. \quad (3.20)$$

Вычислив отношение объемов 3.19 и 3.20, находим объемную долю магнетита:

$$\varphi_m = \frac{V_m}{V_n} = \left(\frac{d_q}{d_q + 2\delta} \right)^3. \quad (3.21)$$

Кроме того, важно учесть объемное содержание частиц в глобуле φ_r . Учитывая рассмотренные объемные доли, можно определить намагниченность такой глобулы:

$$M_{эм} = \varphi_r M_{нас} \varphi_m, \quad (3.22)$$

где $M_{нас} = 4.78 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ – магнитное насыщение магнетита. В работе [86] была экспериментально получена наибольшая объемная концентрация частиц

магнетита в магнитной жидкости $\varphi_r=0,54$. Таким образом, намагниченность глобулы для расчетов примем значение $M_{эм} \approx 100$ кА/м.

Если такую сферическую глобулу поместить в магнитное поле с индукцией B и градиентом ∇B , то магнитная сила частицы определяется формулой [77]:

$$\vec{F}_m = V_{эм} M_{эм} \cdot \nabla B, \quad (3.23)$$

где $V_{эм}$ – объем глобулы, $B = \mu_0 H$ – магнитная индукция, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость.

Омагниченная частица нефти диаметром $d_{эм}$ при перемещении испытывает сопротивление силы вязкого трения воды:

$$\vec{F}_c = 3\pi\eta d_{эм} v, \quad (3.24)$$

где $\eta = 8.9 \cdot 10^{-4}$ Па·с – коэффициент вязкости воды.

Приравняв эти силы, определяем скорость движения капли:

$$v = \frac{V_{эм} M_{эм} \cdot \nabla B}{3\pi\eta d_{эм}} = \frac{d_{эм}^2 \vec{M}_{эм}}{18\eta} \left| \frac{dB}{dZ} \right|, \quad (3.25)$$

где $\left| \frac{dB}{dZ} \right| = |\text{grad } B|$ – модуль градиента вектора индукции магнитного поля.

На сегодняшний день самые сильные магниты это редкоземельные постоянные неодимовые магниты NdFeB (неодим-железо-бор). Эти высокоэнергетические магниты имеют остаточную индукцию 1,2 – 1,4 Тл, поэтому предполагается проектировать магнитную систему устройства на этих магнитах. В таблице 3.2 представлены результаты измерений цифровым гауссметром GM-2 магнитной индукции на различных расстояниях до центра полюса магнита кубической формы со стороной 2.5 см.

Таблица 3.2 – Зависимость величины магнитного поля от дистанции до поверхности магнита

Дистанция до центра полюса магнита, $Z \cdot 10^{-2}$, м	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
B, Тл	0,54	0,44	0,34	0,28	0,22	0,18	0,14	0,11	0,098
$H=B/\mu_0$, кА/м	448	365	282	232	182	149	116	91	81

С учетом того, что наночастицы магнетита становятся магнитно насыщенными при напряженности магнитного поля 100 кА/м, эти магниты могут решать поставленную задачу. Чтобы теоретически оценить возможность экстракции в поле таких магнитов найдем аппроксимирующую функцию индукции и градиента магнитного поля.

Дискретные данные таблицы 3.2 были аппроксимированы экспоненциальной функцией, эмпирическая формула которой имеет вид:

$$B = A \cdot e^{-k \cdot z}. \quad (3.26)$$

Значения A , k можно найти методом наименьших квадратов (МНК). Путем логарифмирования этого равенства, получим:

$$\ln B = \ln A - k \cdot z. \quad (3.27)$$

Суть метода заключается в поиске коэффициентов A и k путем минимизации суммы квадратов отклонений табличных значений от эмпирической функции. Для этого находим частные производные и приходим к системе уравнений:

$$\begin{cases} -k \sum_{i=1}^9 Z_i + 9 \cdot \ln A = \sum_{i=1}^9 \ln B_i \\ k \sum_{i=1}^9 Z_i^2 + \ln A \sum_{i=1}^9 Z_i = -\sum_{i=1}^9 Z_i \cdot \ln B_i \end{cases} \quad (3.28)$$

Аппроксимация по функции 3.26 также была выполнена в пакете Matlab (cftool). Функция индукции с доверительной вероятностью 0,95 представлена на рисунке 3.10: $A=0,5438$ с доверительным интервалом (0.5334, 0.5542) и $k=113.3$ с доверительным интервалом (117.2, 109.3). Таким образом, получена аналитическая формула для определения магнитной индукции неодимового магнитного куба со стороной 2,5 см:

$$B = 0,5438 \cdot e^{-113.3 \cdot z}. \quad (3.29)$$

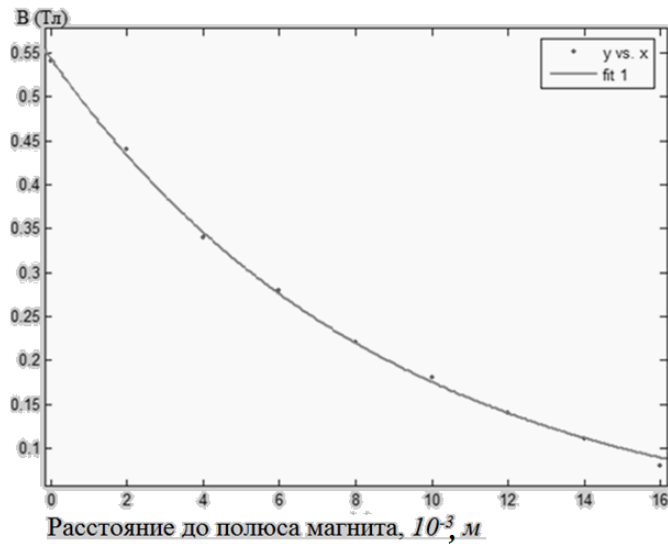


Рисунок 3.10 – Индукции магнитного поля вблизи полюса магнита NdFeB (25 мм)

Найдя градиент магнитного поля, скорость экстракции омагниченной глобулы на поверхность магнита можно определить следующей формулой :

$$v = \frac{d_{\text{эм}}^2 M_{\text{эм}}}{18\eta} 61.61e^{-113.3 \cdot z} \quad (3.30)$$

Возьмем для оценки глобулу с намагниченностью $M_{\text{эм}}=4\text{кА/м}$. С такой намагниченностью применяют магнитные жидкости при сборе нефтепродуктов с поверхности воды. На рисунке 3.11 представлен расчет скорости экстракции глобулы диаметром капель 5 мкм, 15 мкм и 25 мкм. Как средняя так и мгновенная скорость больше у более крупной глобулы, чем у мелкой.

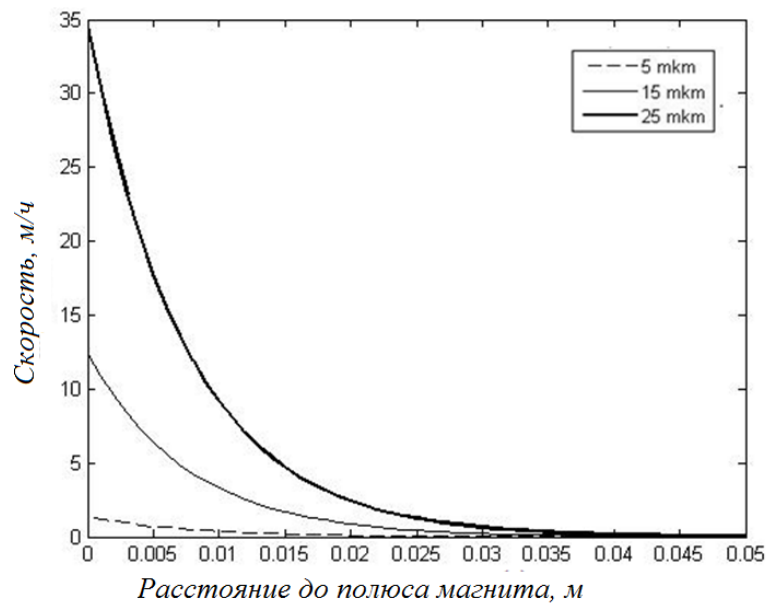


Рисунок 3.11 – Зависимость мгновенной скорости экстракции от расстояния до полюса магнита

Результаты численного расчета показывают, что для омагниченной эмульсии диаметром 25 мкм скорость под действием магнитной силы примерно в 10 раз больше скорости седиментации.

Применение магнитной жидкости для извлечения из воды эмульсий с такими размерами невозможно. Расчет был произведен для оценки возможности извлечения омагниченной капли с помощью неодимового магнита. Дело в том, что использование магнитной жидкости возможно только для очистки вод от нефтепродуктов, которые находятся в неэмульгированном или грубоэмульгированном состоянии из-за их устойчивости к коалесценции. Устойчивость эмульсий связана с наличием поверхностно-активных веществ (эмульгаторов) на разделе фаз нефти и воды. Такими эмульгаторами являются асфальтены, смолы, механические примеси, микрокристаллы парафинов, соли нафтеновых кислот [47]. Эти вещества сорбируются на разделе фаз нефти и воды, уменьшая межфазное натяжение и повышая устойчивость системы в целом.

Таким образом, предложенные аналитические функции индукции магнитного поля, его градиента для магнитов NdFeB и скорости показали реальную возможность извлечения омагниченной эмульсионной капли намагниченностью $M_{эм} = 4 \text{ кА/м}$. Рассматриваемые магниты NdFeB имеют индукцию на поверхности больше 0,5 Тл и могут захватить омагниченные наночастицами магнетита капли на расстоянии около 25 мм, поэтому могут быть применены на испытаниях.

3.1.3.2 Моделирование экстракции капли нефтяных эмульсий с помощью нанодисперсных магнитных частиц и силового воздействия неоднородного магнитного поля

При проектировании магнитного сепаратора предназначенного для очистки воды от нефти омагниченной нанодисперсным магнетитом является расчёт намагниченности и магнитного момента извлекаемой нефтяной частицы. Для этого рассмотрим следующую модель. Имеется сферическая частица эмульсии типа нефть в воде с диаметрами $d_{эм}$. На поверхности такой глобулы нефти

граничным образом расположены и образуют монослой суперпарамагнитные наночастицы магнетита с диаметрами d_q . Для этой глобулы нефти необходимо выполнить расчет магнитного момента и рассчитать скорость экстракции в неоднородном магнитном поле.

Расчет намагниченности глобулы нефти покрытой монослоем магнетита можно выполнить по формуле:

$$M_{эм} = \varphi M_{нас} L(z_q), \quad (3.31)$$

где φ – объемная доля магнетита в эмульсии; $M_{нас} = 4 \cdot 10^5$ А/м – намагниченность насыщения для магнетита; B – величина модуля вектора индукции; $L(z_q)$ – функция Ланжевена:

$$L(z_q) = \text{cth}(z_q) - 1/z_q \quad (3.32)$$

где z_q – аргумент функции Ланжевена:

$$z_q = \frac{V_q M_{нас} B}{k_b T}. \quad (3.33)$$

В этом выражении k_b – постоянная Больцмана, а T – абсолютная температура. В формуле 3.13 необходимо оценить объемную долю магнетита в составе глобулы нефти. Объемная концентрация магнитных наночастиц в глобуле нефти равна отношению общего объема монодисперсных частиц магнетита, участвующих в системе, к объему эмульсии:

$$\varphi_q = \frac{N_q V_q}{V_{эм}}, \quad (3.34)$$

V_q , $V_{эм}$ – объем магнитной частицы и объем глобулы нефти соответственно. Наибольшее число частиц магнетита N_{max} , образующих монослой на поверхности глобулы нефти можно определить, как отношение площади поверхности эмульсии $S_{эм}$ к площади проекции магнитных наночастиц $S_{пр.ч.}$:

$$N_{max} = \frac{S_{эм}}{S_{пр.ч.}}, \quad (3.35)$$

Выразив площади через диаметр частиц, получим:

$$N_{max} = \frac{4d_{эм}^2}{d_q^2}. \quad (3.36)$$

Введем нормируемую величину коэффициента упаковки магнитных наночастиц $0 \leq k \leq 1$ на поверхности глобулы нефти. Таким образом, численность наночастиц на поверхности глобулы нефти определяется формулой:

$$N_q = k \cdot N_{max} \quad (3.37)$$

Подставим формулу 3.37 в формулу 3.34 получим:

$$\varphi_q = \frac{4kd_q}{d_{эм}}. \quad (3.38)$$

Таким образом, намагниченность капли определяется по формуле:

$$M_{эм} = \frac{4kd_q}{d_{эм}} M_{нас} L(z_q). \quad (3.39)$$

Учитывая формулу скорости движения омагниченной капли вдоль некоторой оси Z (3.25), и намагниченности $M_{эм}$ из формулы (3.39), формула скорости извлечения капель эмульсии получит вид:

$$v = \frac{4kd_{эм} d_q M_{нас} L(z_q)}{18\eta} \left| \frac{dB}{dZ} \right|. \quad (3.40)$$

Таким образом, по найденной ранее аналитической формуле магнитной индукции и градиента магнитного поля неодимового магнитного куба со стороной 25 мм, можно оценить возможность извлечения глобулы нефти, покрытой монослоем магнитных наночастиц магнетита с коэффициентом упаковки k :

$$v = \frac{4kd_{эм} d_q M_{нас} L(z_q)}{18\eta} 61.61 \cdot e^{-113.3 \cdot Z} \quad (3.41)$$

В качестве начальных данных были выбраны гидрофильные магнитные наночастицы с диаметром 10 нм. Такие частицы не обладают коэрцитивным полем, поэтому имеют слабую энергию взаимодействия между частицами, поэтому образование агрегатов обратимо. По известной методике получения магнитных частиц магнетита Fe_3O_4 [110] можно получить частицы с размерами около 10 нм, поэтому численные расчеты будут проводиться для частиц таких размеров.

При расчетах скорости экстракции и намагниченности примем $\eta = 8.9 \cdot 10^4 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Намагниченность насыщения для магнетита $M_{\text{нас}} = 4.78 \cdot 10^5 \text{ А/м}$. Коэффициент упаковки магнитных наночастиц на поверхности эмульсий $k = 0.5$. Оценка средней скорости была вычислена по формуле:

$$V_{\text{ср}} = \frac{l}{\int_0^l \frac{dz}{v}}, \quad (3.42)$$

где l – расстояние до полюса магнита, м; v – функция скорости движения эмульсии в поле неодимового магнита.

На рисунке 3.12 показаны результаты численного расчета намагниченности частицы эмульсии нефти с диаметром $d_{\text{эм}} = 10 \text{ мкм}$. Для омагничивания эмульсии применялись частицы магнетита диаметром от 5 до 20 нм.

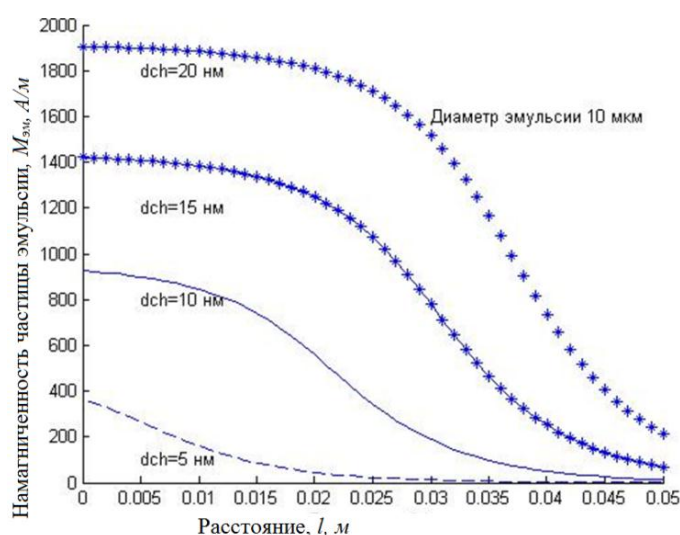


Рисунок 3.12 – Зависимость намагниченности капли размером 10 мкм от расстояния до полюса магнита

В таблице 3.3 представлены результаты расчетов по построенной модели: намагниченности, скорости и времени захвата магнитом NdFeB.

Таблица 3.3 – Расчет намагниченности и скорости капли при $d_{\text{ч}} = 10 \text{ нм}$ в поле магнитного куба NdFeB со стороной 25 мм.

Диаметр капли нефти $d_{\text{эм}}$ (мкм)	5	10	15	20	25	30	50	60	70
Намагниченность капли при насыщении (кА/м)	1.85	1.43	1.12	0.95	0.46	0.31	0.18	0.15	0.13
Средняя скорость частицы эмульсии (мм/мин) на участке (0,2) см	0.19	0.38	0.57	0.76	0.95	1.11	1.91	2.30	2.68
Время осаждения (мин) на участке (0,2) см	104.3	52.1	34.7	26.1	20.8	17.3	10.4	8.7	7.4

Несмотря на то, что при увеличении размера капли, покрытой слоем магнитных частиц, намагниченность падает из-за уменьшения объемной доли магнетита, скорость извлечения увеличивается. При этом мелкие капли нефти имеют сравнительно невысокую среднюю скорость извлечения. Например, для эмульсии размером 50 мкм понадобится более 10 мин для преодоления участка длиной 2 см. Такие капли извлекать в режиме динамической очистки не эффективно.

На рисунке 3.13 приведены графики изменения скоростей для эмульсий различных размеров, омагниченных частицами магнетита с размерами 10 нм. На расстоянии менее 2 см, наночастицы магнетита становятся магнитно насыщенными, капли получают движение, обусловленное неоднородным полем неодимовых магнитов. Этот интервал можно принимать, как радиус действия магнитов. При этом если использовать более крупные суперпарамагнитные частицы, то радиус действия для них будет больше (рис. 3.14). Для частиц магнетита с размерами 20 нм радиус действия неодимовых магнитов около 3 см.

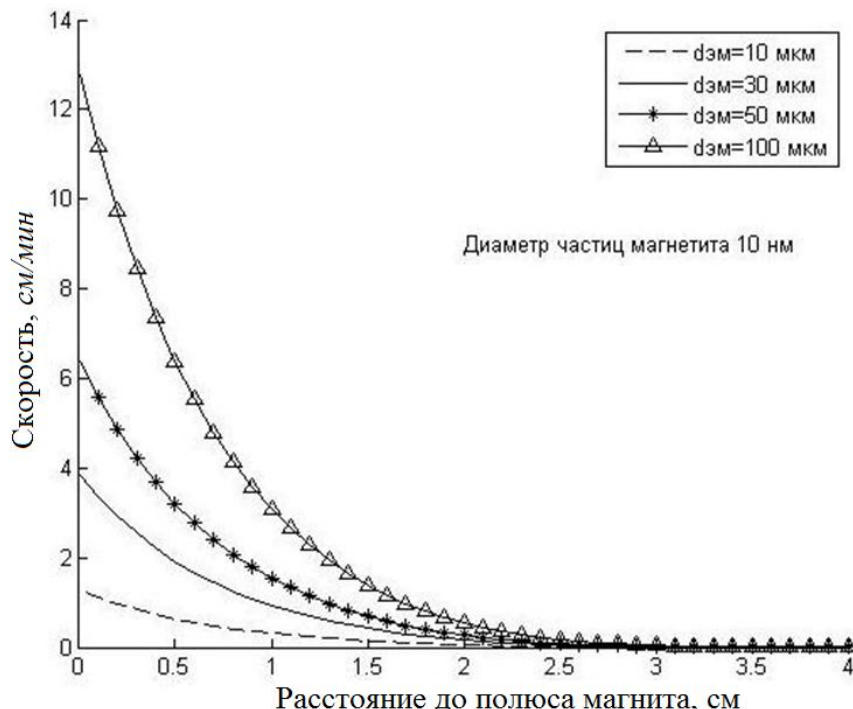


Рисунок 3.13 – Зависимость скорости извлечения капли от расстояния до полюса магнита

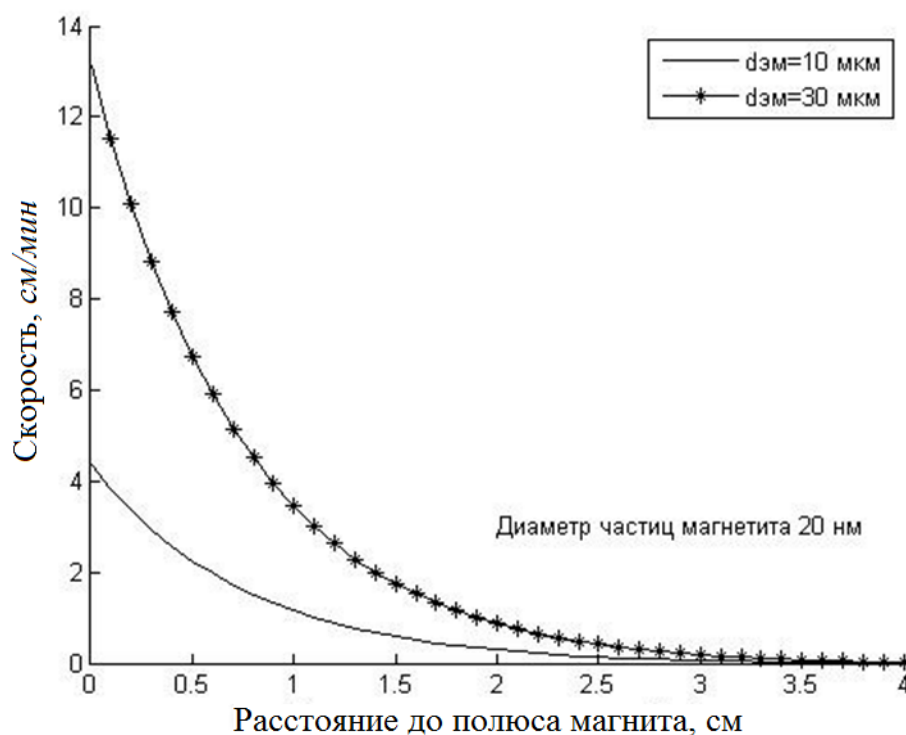


Рисунок 3.14 – Зависимость скорости извлечения капли от расстояния до полюса магнита

Существенно увеличивается скорость частицы эмульсии при увеличении размера наночастицы. Например, для эмульсии диаметром 30 мкм скорость увеличивается в 3 раза. Негативным моментом использования частиц с более крупными размерами является то, что частицы будут собираться в более крупные агрегаты и хуже взаимодействовать с поверхностью нефти. В дальнейшей работе планируется использовать частицы магнетита с размерами 10 нм.

Исходя из полученных расчетов и анализа, можно определить значительную роль размера частиц и градиента магнитного поля на эффективность очистки. Также значительную роль играет размер капель дисперсной фазы. С укрупнением эмульсий экстрагируемых компонентов увеличивается скорость их извлечения. Таким образом, при разработке магнитного сепаратора, предназначенного для решения задачи по извлечению эмульсии покрытой монослоем наночастиц магнетита, должны быть учтены следующие положения:

- Для обеспечения высокой дисперсности коллоидной системы необходимо использовать наночастицы магнетита с размерами порядка 10 нм;

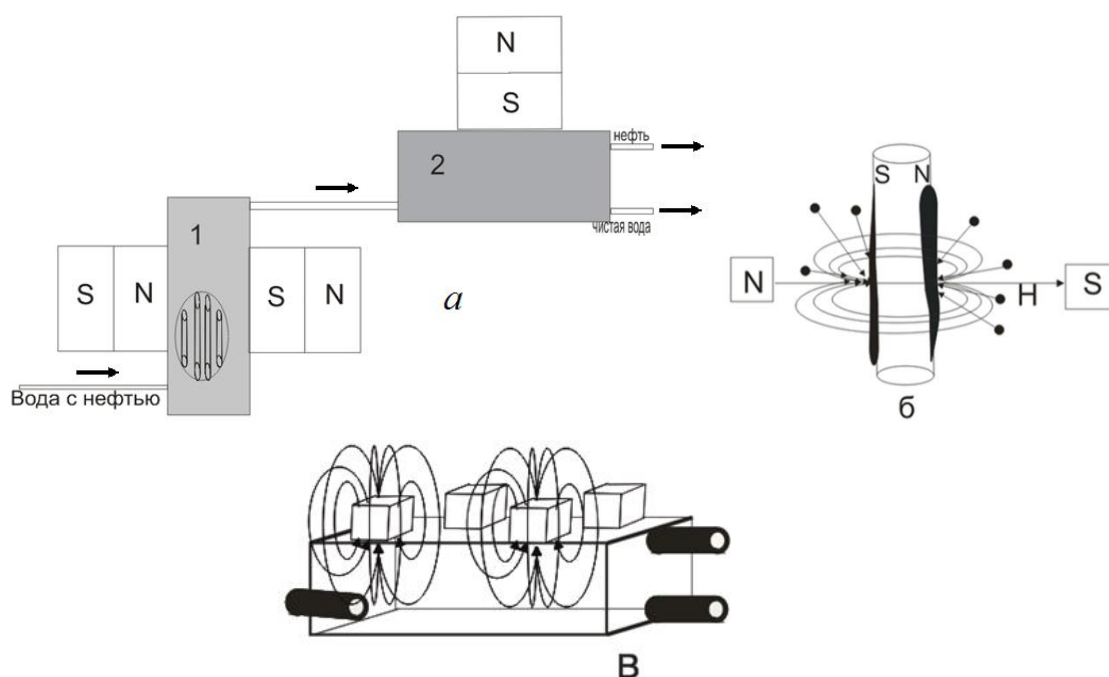
- Обеспечение напряженности магнитного поля не ниже 80–100 кА/м (0,1–0,12 Тл) и высокого градиента магнитного поля;
- Сокращение дальности экстракции эмульсий;

3.2 Выбор оптимальных параметров магнитного сепаратора для экстракции омагниченной глобулы нефти

В работе [40] с учетом предлагаемых положений, на основе выполненного моделирования и теоретического анализа, предлагается магнитный сепаратор с фильтрующим элементом изготовленный в виде ферромагнитного картриджа (рисунок 3.15 а, б), который находится в магнитном поле, создаваемое постоянными магнитами. Ферромагнитный картридж изготовлен из множества упорядоченных тонких стальных стержней, находящихся в магнитном поле. Стержни намагничиваются и за счет самоиндукции образуют вокруг себя неоднородное магнитное поле. За счет близкого расположения стержней в картридже сокращается дальность и время экстракции. Силовое взаимодействие поля на поверхности ферромагнитного материала будет способствовать коалесценции эмульсионных капель [114].

Схема работы сепаратора изображена на рисунке 3.15, а. Водный раствор частиц магнетита смешивается с пластовой водой. После процесса сорбции она поступает в первый магнитный сепаратор с ферромагнитным картриджем (рисунок 3.15, а). Омагниченные нефтяные глобулы оседают и коалесцируют на стальных стержнях. Далее укрупненные капли могут быть легко извлечены простыми магнитными устройствами 2.

Основная задача настоящей работы – это разработать магнитное устройство 1 для укрупнения и эффективной экстракции эмульсионных частиц нефти совместно с нанодисперсным магнетитом.



1 – Магнитный сепаратор 1 (с ферромагнитной упаковкой); 2 – устройство для захвата укрупненных частиц при промывке; *N*, *S* – полюса магнитов
 Рисунок 3.15 – Элементы и узлы схемы работы очистительной установки: а) общая схема установки; б) силовые линии магнитного поля стального прута магнитного сепаратора 1; в) магнитный сепаратор 2

Исходя из выводов предыдущей главы, необходимо установить расположение магнитов таким образом, чтобы магнитного индукция была не ниже 0,12 Тл и определить оптимальное расположение и расстояние между стержнями упаковки магнитного сепаратора, при котором будет наблюдаться высокий градиент магнитного поля. Это позволит определить конфигурацию и радиус действия магнитного поля. Кроме того, для оценки скорости очистки необходимо найти аналитическую функцию напряженности и градиента магнитного поля около стержня.

В программе ELCUT 6.0 все расчеты проводились с применением двумерного моделирования (плоскопараллельное решение задач).

Магнитная индукция и коэрцитивная сила, представленные в источнике [41] в различных сплавах магнитов NdFeB, принимали значения $B_r=1,1-1,3$ Тл и $H_c=950 - 1900$ кА/м. При составлении моделей остаточная магнитная индукция для магнитов NeFeB была принята $B_r=1,1$ Тл, а коэрцитивная сила $H_c=950$ кА/м.

Анализ типов сталей показал, что для изготовления ферромагнитных стержней наиболее целесообразно использовать электротехническую сталь 2312 по ГОСТ 21427.2-83, предназначенную для магнитных цепей, электрических машин, аппаратов и приборов. В таблице 3.4 представлены значения кривой намагничивания стали 2312 [26].

Таблица 3.4 – Основная кривая намагничивания стали 2312

H_c , А/м	68	76	86	96	140	190	240	300
B , Тл	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1
H_c , А/м	400	550	1000	1600	3400	7700	13400	19400
B , Тл	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9

На рисунке 3.16 показаны результаты расчета магнитного поля (с упаковкой и без) неодимовых магнитов размерами 25 мм x 25 мм x 25 мм. В модели магниты были расположены на расстоянии 22 мм друг от друга. Возможности программы ELCUT 6.0 позволяют оценивать индукцию магнитного поля не только по шкале градации, но и по локальным значениям магнитного поля с помощью инструментов программы. Для этой модели локальные значения магнитной индукции между магнитами составили 0,3–0,54 Тл.

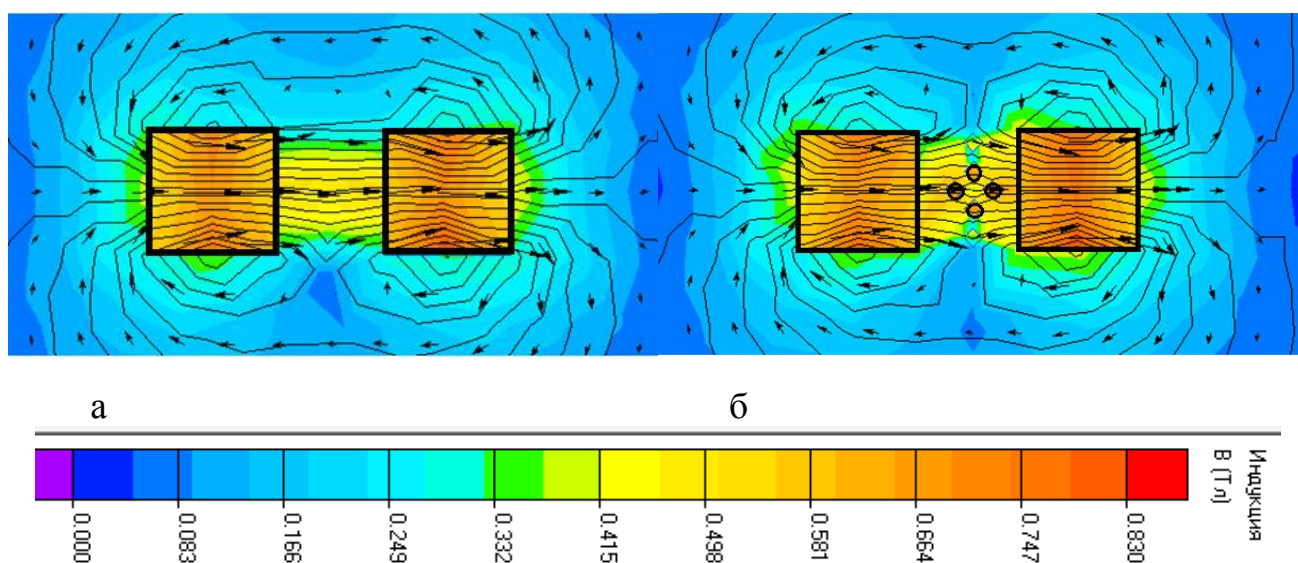


Рисунок 3.16 – Магнитное поле между неодимовыми магнитами (расстояние между магнитами 22 мм): а – магнитное поле без стержней; б – магнитное поле с ферромагнитными стержнями

При увеличении дистанции между магнитами до 3 см (рисунок 3.17) наблюдается уменьшение величины нижней границы магнитной индукции до 0,25 Тл. На рисунке 3.17, б зеленой линией (кроме области, отмеченной красной линией) отмечена область, где наблюдается напряженность около 100 кА/м. Таким образом, при изготовлении испытательного образца магнитного сепаратора рабочую область можно располагать между магнитами.

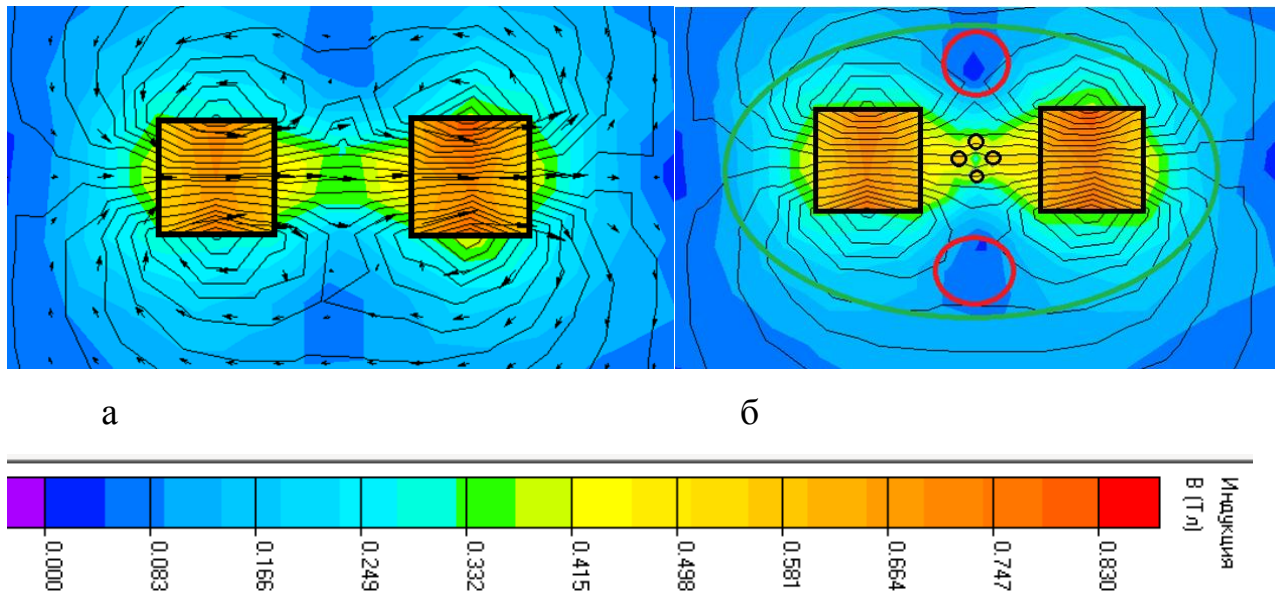


Рисунок 3.17 – Магнитное поле магнитных кубиков NdFeB (расстояние между магнитами 30 мм): а – магнитное поле без стержней; б – Магнитное поле с ферромагнитными стержнями

В магнитном сепараторе магниты следует также размещать из расчета намагниченности стальных стержней в поле неодимовых магнитов. Другими словами, стальные стержни должны индуцировать достаточное магнитное поле, при этом наблюдаемый градиент должен обеспечивать эффективное извлечение омагниченной эмульсионной капли.

На рисунке 3.18 в программе Elcut представлены расчеты магнитного поля стального стержня диаметром 2 мм при различных напряженностях магнитного поля. Из-за подбора небольшого количества конечных элементов поперечный разрез стержня имеет не форму окружности, а форму шестиугольника. Видно, что собственная индукция и градиент магнитного поля стержня наблюдаются на расстоянии 2 мм при полях 0,3 Тл. При меньшем внешнем магнитном поле 0,1 Тл поле стержня наблюдается на расстояниях до 1,5 мм.

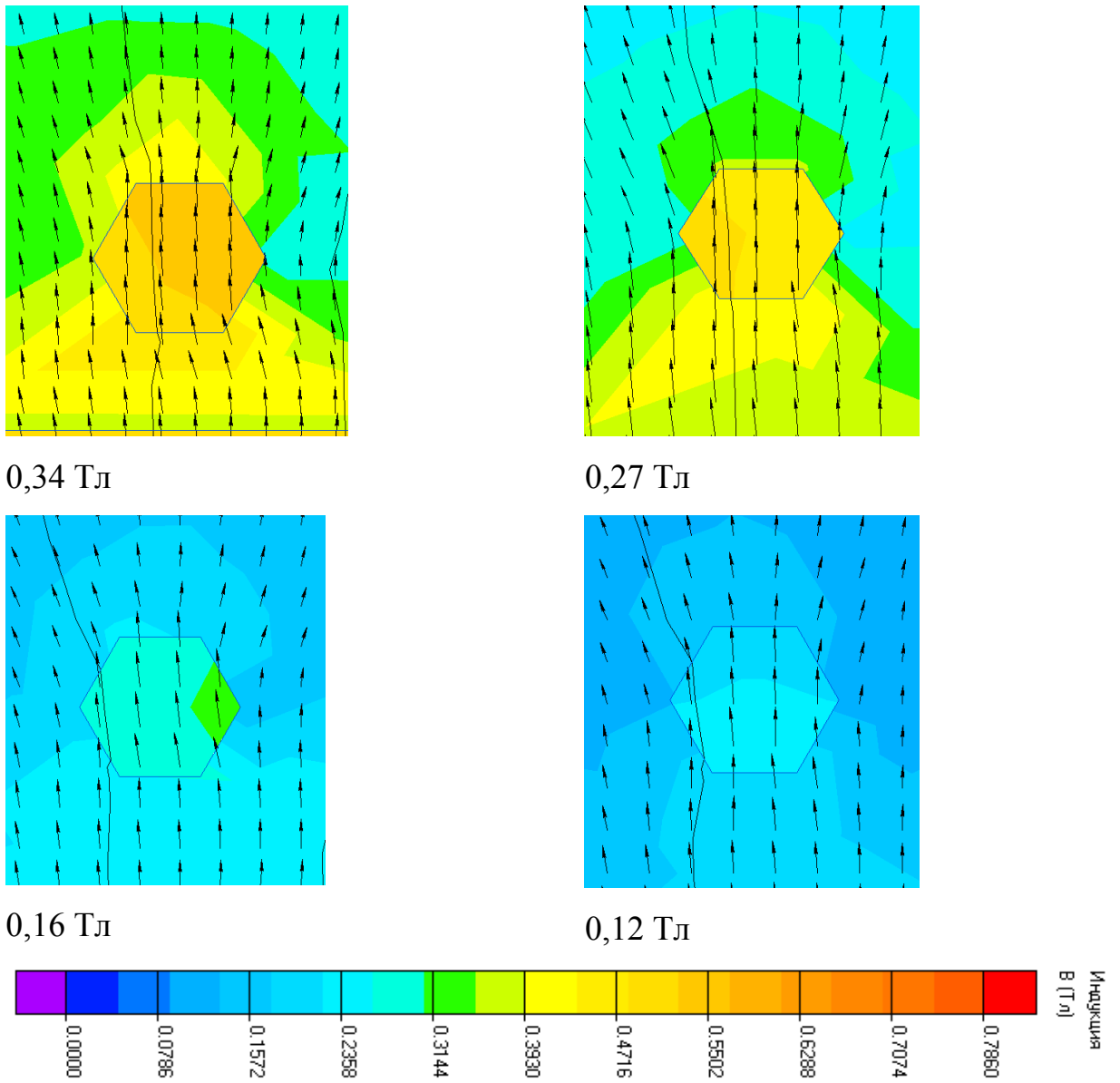
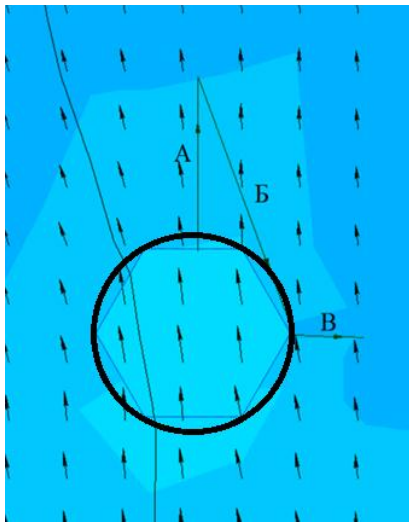
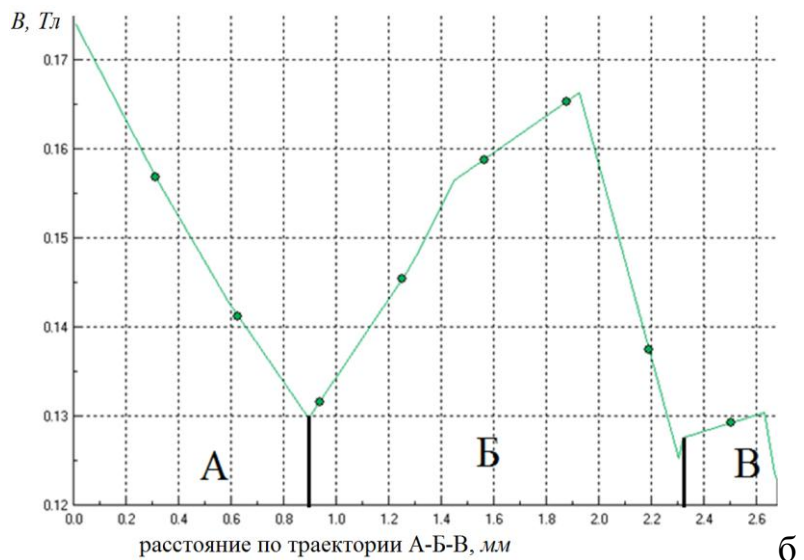


Рисунок 3.18 – Магнитное поле стержня в поперечном сечении диаметром 2 мм

На рисунке 3.19, а выполнен расчет магнитного поля стального стержня диаметром 1 мм и анализ магнитного поля (рисунок 3.19, б). Стержень находится в поле 0,12 Тл. В таком поле наночастицы магнетита достигают магнитного насыщения. На рисунке 3.19, б график индукции построен по отмеченным траекториям А–Б–В. Исходя из этих двух рисунков видно, что собственное магнитное поле стержня наблюдается на расстоянии до 1 мм (3.19, б, траектория А).



а



б

А – траектория от полюса стального стержня параллельно вектору внешнего магнитного поля, Б – траектория до правого бока стержня, В – траектория от правого бока перпендикулярно внешнему полю

Рисунок 3.19 – Магнитное поле стержня в поперечном сечении диаметром 1 мм в поле 0,12 Тл. а – расчет магнитного поля; б – график индукции магнитного поля по траекториям

Кроме того, на Рисунке 3.19, а по траектории А линейный градиент магнитного поля составил 50 Тл/м . По траектории В проявляется слабое поле соразмерное с внешним полем. Это происходит из-за того, что вектор напряженности стального стержня в этом месте направлен противоположно вектору напряженности внешнего поля неодимовых магнитов.

Расчеты магнитного поля ферромагнитной упаковки сепаратора производились на примере стержней диаметром 1 мм, расположенных на расстоянии 1 мм. Такой выбор сделан опытным путем, исходя из тех соображений, что увеличение толщины стержней и расстояния между ними приводит к уменьшению градиента. Несмотря на то, что уменьшение толщины стержней и расстояния между ними влечет рост градиента, упругость под действием магнитных сил не позволяет устанавливать слишком тонкие стержни в рассматриваемой конструкции. Например, для стержня толщиной 0,5 мм проявление собственной индукции наблюдается на расстоянии 0,3 мм.

На основе выбранной толщины стержня 1 мм исследуем их расположение в ферромагнитном картридже. Рассмотрим два возможных варианта расположения

стальных стержней. На рисунке 3.20, а представлено расположение стержней в картридже в виде ромба и на рисунке 3.20, б – в виде квадрата.

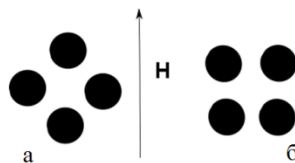
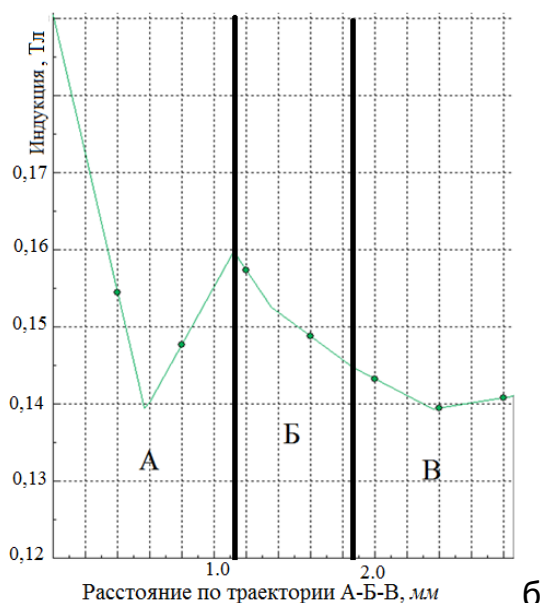
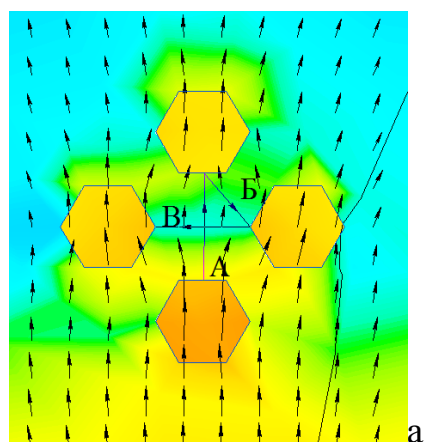


Рисунок 3.20 – Расположение стержней в магнитном поле: а – стержни с ромбовидным расположением, б – с квадратным расположением

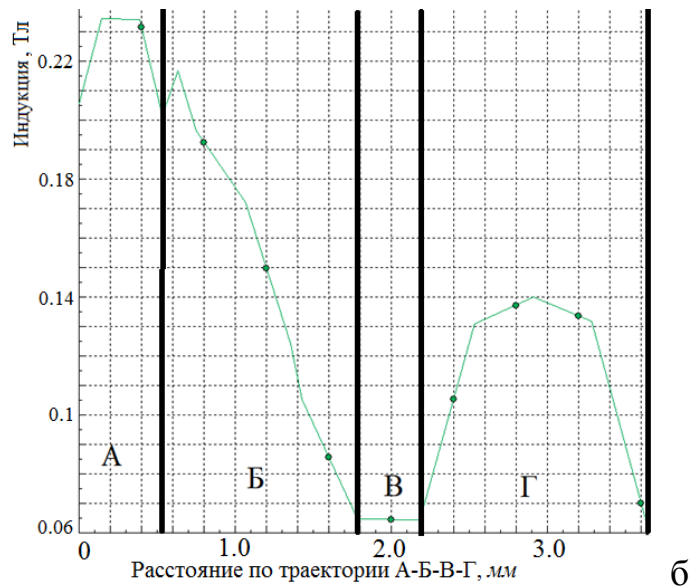
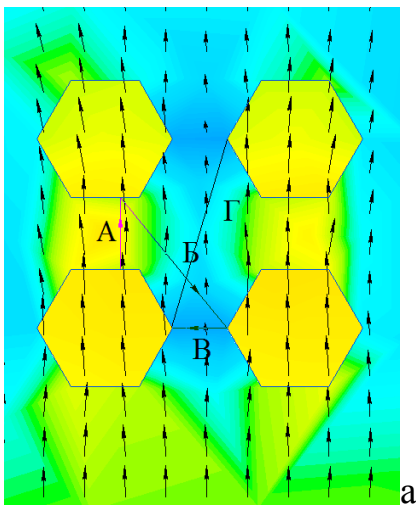
Выполнен расчет магнитного поля для стальных стержней **типа ромб** в поле с индукцией 0,12 Тл (рисунок 3.21 а, б). Исходя из расчетов, проиллюстрированных на рисунке 3.19, расстояния между стержнями были установлены также 1 мм. На рисунке 3.21, б по траекториям А и Б можно наблюдать большие градиенты магнитной индукции, чем в направлении В. Слабые градиенты поля между левым и правым стержнем компенсируются верхними и нижними стержнями (траектория А). Внутри области, ограниченной стальными стержнями, наблюдаются сильные градиенты, поэтому расположение типа ромб может быть использовано при изготовлении магнитного сепаратора.



А – траектория от нижнего до верхнего стержня; Б – от верхнего до правого; В – от правого до левого

Рисунок 3.21 – Магнитное поле стержней в поперечном сечении диаметром 1 мм расположения типа ромб в поле 0,12 Тл (расстояние между стержнями 1 мм): а – расчет магнитного поля; б – график индукции магнитного поля по траекториям

Расположение стержней типа квадрат является менее удачным (рисунок 3.22). Магнитное поле усиливается в между верхним и нижним стержнем (траектория А). При этом по траектории В и Г наблюдаются сильные спады магнитного поля. Это происходит потому, что стержни самоиндуцируют магнитное поле, направление которого противоположно направлению внешнего магнитного поля. В результате происходит сильный спад индукции в основной рабочей области. Об этом свидетельствует траектория Г на рисунке 3.22, б. Таким образом, расположение стержней в картридже типа ромб является наиболее целесообразной.

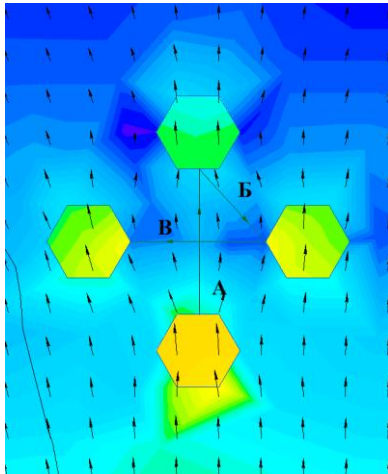


А – траектория от нижнего левого до верхнего левого стержня; Б – от верхнего левого до нижнего правого; В – от нижнего правого до нижнего левого; Г – от нижнего левого до верхнего правого

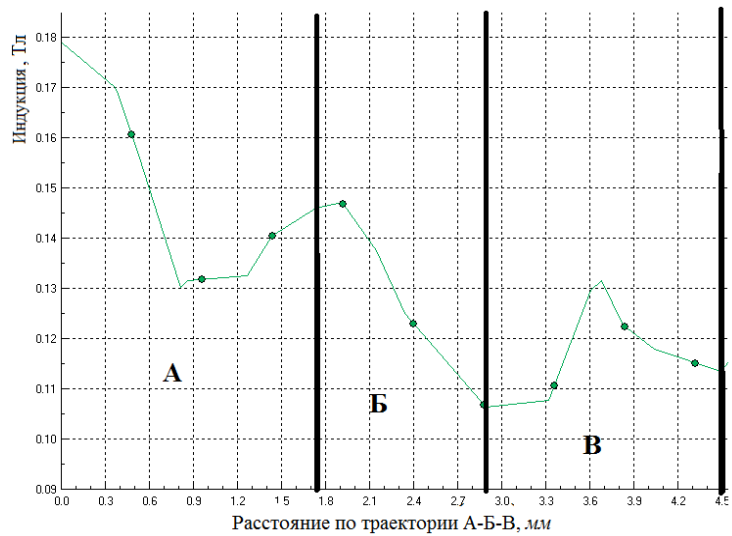
Рисунок 3.22 – Магнитное поле стержней в поперечном сечении диаметром 1 мм расположения типа квадрат в поле 0,12 Тл (диагональное расстояние между стержнями 1 мм): а – расчет магнитного поля; б – график индукции магнитного поля по траекториям

Далее выполним оценку градиента поля при расположении стержней типа ромб при различных внешних полях и на различных расстояниях до стержня. По Рисунку 3.23 можно заметить, что при увеличении расстояния между стержнями до 1,5 мм наблюдается небольшое падение поля во внутренней области ниже 0,11 Тл при внешнем поле 0,12 Тл. Кроме того, по графику индукции (рисунок 3.23, б) по траектории А (0,8-1,3 мм) не наблюдается сильных изменений магнитного поля, что свидетельствует о слабом градиенте индукции. Кроме того, увеличение

расстояния между стержнями приведет к увеличению времени экстракции. Таким образом, увеличение расстояния между стержнями нецелесообразно.



а

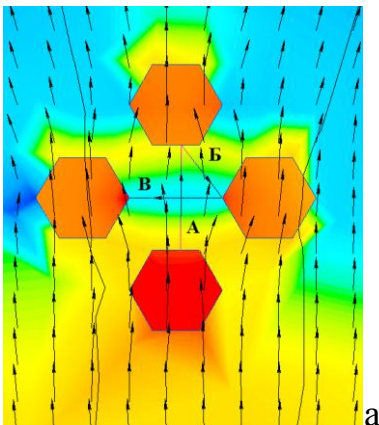


б

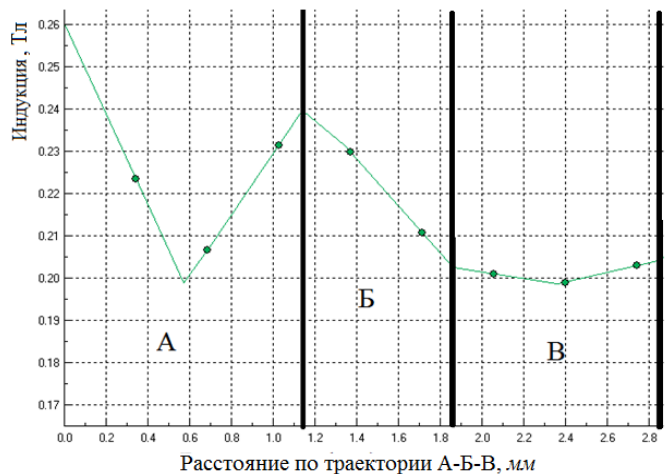
А – траектория от нижнего до верхнего стержня; Б – от верхнего до правого;
В – от правого до левого

Рисунок 3.23 – Магнитное поле стержней в поперечном сечении диаметром 1 мм расположения типа ромб в поле 0,12 Тл (расстояние между стержнями 1,5 мм): а – расчет магнитного поля; б – график индукции магнитного поля по траекториям

На Рисунках 3.24 и 3.25 представлены изменения магнитных полей внутри области, окруженной стальными стержнями, при увеличении внешнего магнитного поля.



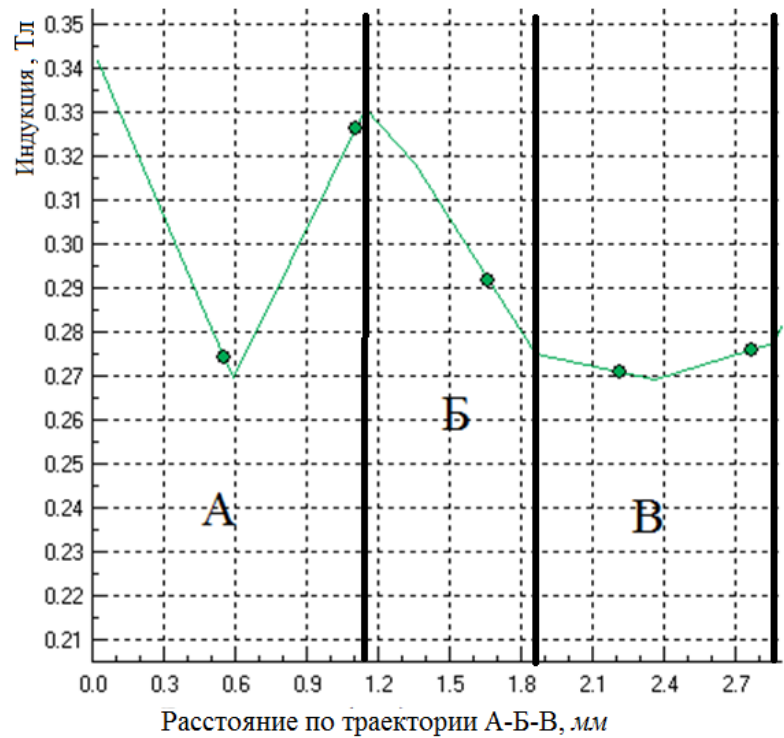
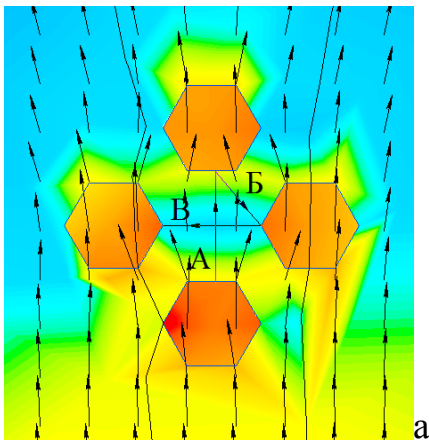
а



б

А – траектория от нижнего до верхнего стержня; Б – от верхнего до правого; В –
от правого до левого

Рисунок 3.24 – Магнитное поле стержней в поперечном сечении диаметром 1 мм расположения типа ромб в поле 0,19 Тл (расстояние между стержнями 1 мм): а – расчет магнитного поля; б – график индукции магнитного поля по траекториям



А – траектория от нижнего до верхнего стержня; Б – от верхнего до правого; В – от правого до левого

Рисунок 3.25 – Магнитное поле стержней в поперечном сечении диаметром 1 мм расположения типа ромб в поле 0,26 Тл (расстояние между стержнями 1 мм): а – расчет магнитного поля; б – график индукции магнитного поля по траекториям

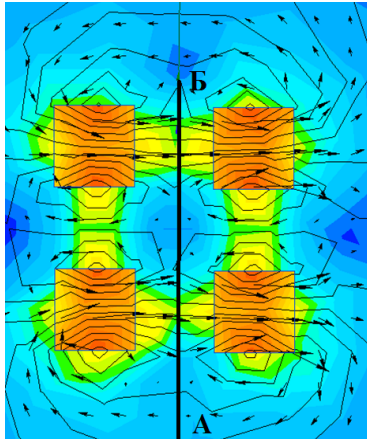
Исходя из данных расчетов (рисунок 3.24, 3.25) при увеличении внешнего поля растет также и градиент магнитной индукции. Средние оценки градиентов индукции (по траектории А) при различных внешних полях представлены в Таблице 3.5. Например, при изменении индукции от 0,12 Тл до 0,45 Тл скорость извлечения эмульсии возрастет в 5,5 раз, но это приведет к уменьшению площади рабочей области. Как этот момент скажется на производительности сепаратора, рассмотрим позже.

Таблица 3.5 – Среднее значение градиента индукции внутри области, ограниченной ферромагнитными стержнями по траектории А при различных внешних полях

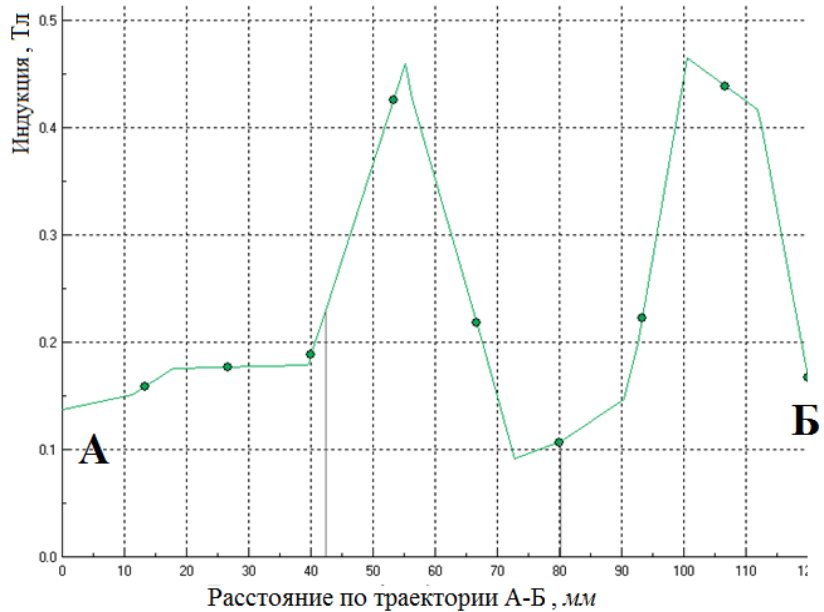
Внешнее поле В (Тл)	0,12	0,19	0,26	0,3	0,45
Градиент индукции (10^2 Тл/м)	0,7	0,95	1,3	1,6	2,2

Испытания проводились с применением магнитов NdFeB кубической формы (со стороной 25 мм). На Рисунке 3.26, 3.27 представлены два возможных

варианта расположения неодимовых магнитов в магнитном сепараторе. Расстояния между верхним и нижним, левым и правым магнитами были определены 25 мм. Течение жидкости проходит по траектории АБ (рисунок 3.26, а и 3.27, а).

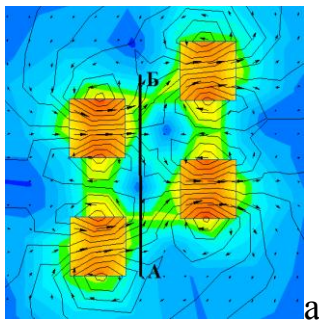


а

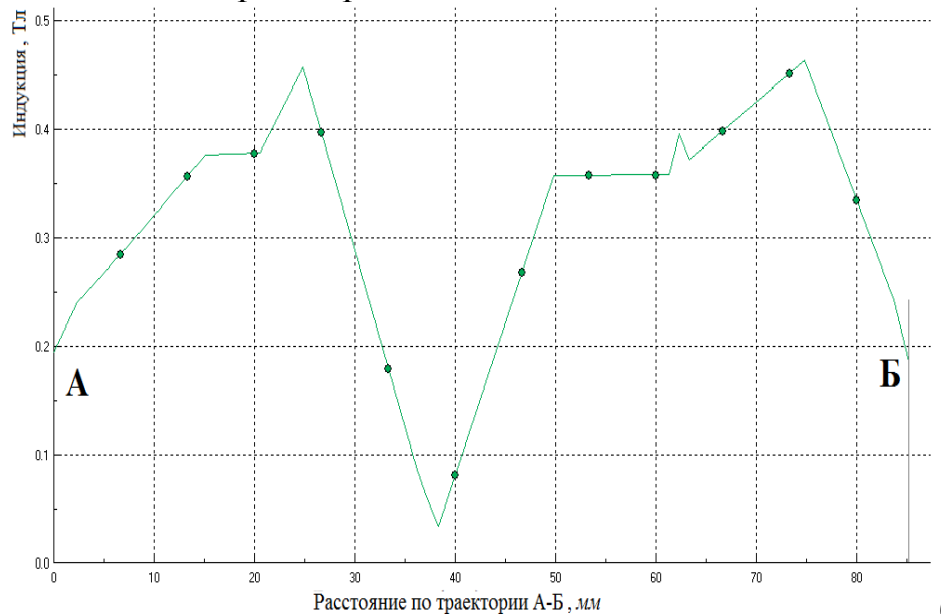


б

Рисунок 3.26 – Магнитное поле между неодимовыми магнитами (сторона магнита 25 мм) а – расчет магнитного поля; б – график индукции магнитного поля по траектории АБ



а



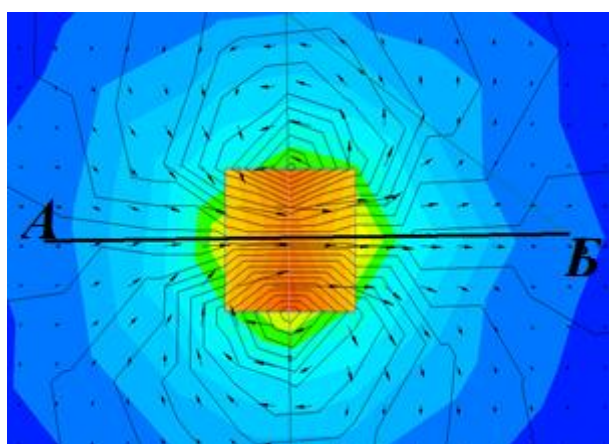
б

Рисунок 3.27 – Магнитное поле между неодимовыми магнитами (сторона магнита 25 мм) а – расчет магнитного поля; б – график индукции магнитного поля по траектории АБ

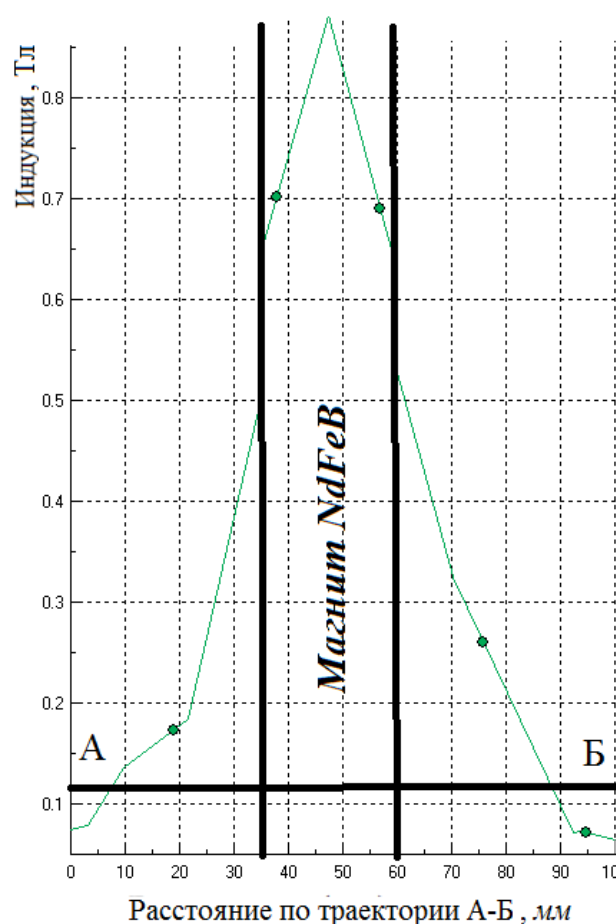
На рисунках 3.26, б и 3.27, б представлены графики магнитной индукции по траекториям АБ. В обоих вариантах наблюдается незначительный участок, на

котором индукция ниже 0,1 Тл. На Рисунке 3.26 меньше провалов магнитной индукции ниже 0,1 Тл, поэтому этот вариант расположения магнитов будем применять при изготовлении опытного образца.

Конечно же, при таком расположении магнитов, как на рисунке 3.26 и 3.27 не используются поля, которые находятся между верхним и нижним магнитом. Таким образом, наиболее правильным решением будет поместить такой магнит в центре магнитного сепаратора. На рисунке 3.28 можно видеть, что рабочая область сепаратора (магнитная индукция больше 0,1 Тл) в поперечном сечении находится внутри круга на расстояниях менее 25-30 мм от поверхности магнита (рисунок 3.28)



а



б

Рисунок 3.28 – Магнитное поле неодимового магнита (сторона магнита 25 мм) а – расчет магнитного поля; б – график индукции магнитного поля по траектории АБ

Но измерения, полученные в таблице 3.2, показывают, что радиус действия у магнита NdFeB со стороной 25 мм несколько меньше. Поэтому при

изготовлении сепаратора с такими неодимовыми магнитами рабочую область целесообразно располагать на расстояниях до 25 мм.

Таким образом, при изготовлении опытного образца магнитного сепаратора магнитная система представляет собой упорядоченное (в виде ромба) множество тонких стальных стержней диаметром 1 мм. При этом ферромагнитная упаковка находится на расстоянии не более 25 мм от полюса магнита.

Выводы по главе

1. Выполнен комплекс моделирования режимов работы неодимового магнитного сепаратора с применением нанодисперсного магнетита, на основе которого можно выбрать оптимальные параметры магнитной индукции и градиента магнитного поля, намагниченности магнетита и магнитного момента эмульсии, обеспечивающий эффективность очистки пластовых вод от эмульгированных нефтепродуктов.

2. При разработке магнитного сепаратора и методологии его эксплуатации для извлечения омагниченных эмульгированных нефтепродуктов с применением нанодисперсного магнетита, должны быть учтены следующие положения:

- для обеспечения высокой дисперсности коллоидной системы необходимо использовать наночастицы магнетита с размерами порядка 10 нм;
- сокращение дальности экстракции эмульсий при этом увеличивается градиент;
- напряженность магнитного поля в рабочей области сепаратора должна быть около 80-100 кА/м. При таком поле наночастицы магнетита становятся магнитно насыщенными.

• получена формула для оценки скорости движения омагниченной нанодисперсным магнетитом эмульсионной капли нефти в неоднородном магнитном поле:

$$v = \frac{4kd_{эм}d_qM_{нас}L(z_q)}{18\eta} \left| \frac{dB}{dZ} \right|$$

- Установлено, что расположение стальных стержней в картридже магнитного сепаратора **типа ромб** по отношению к внешнему магнитному полю. Среди других рассмотренных, при таком расположении наблюдается оптимальное

значение индукция и градиента магнитного поля в рабочей области между стержнями. Расстояние между стержнями диаметром 1 мм устанавливать не более 1 мм. При выборе стержней другой толщины следует располагать их на расстояниях не больше толщины самих стержней.

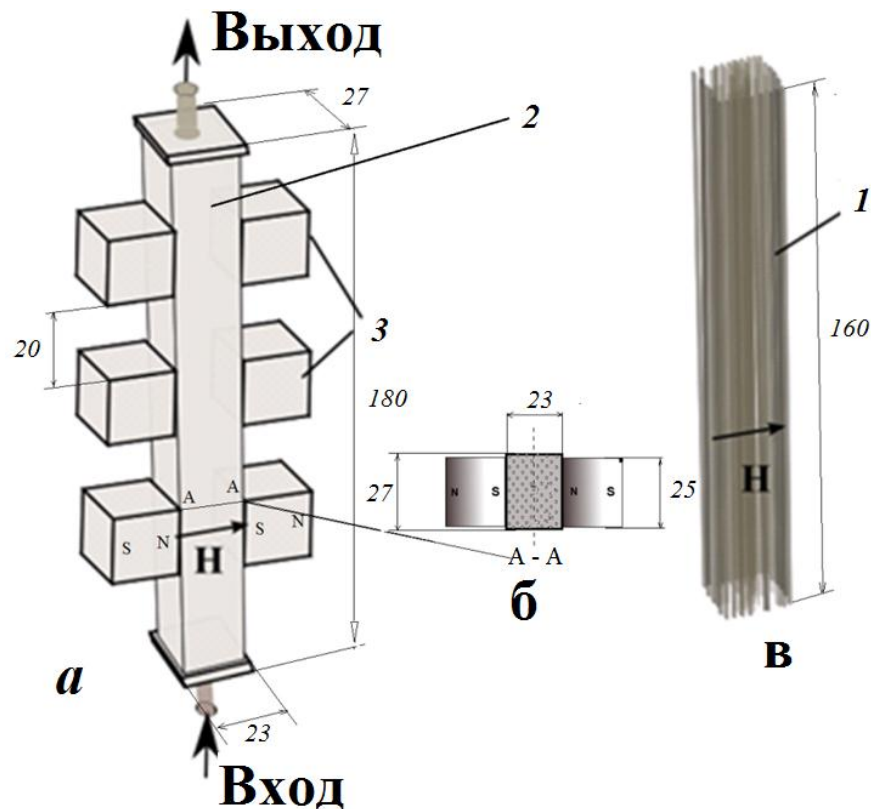
- Установлено, что распределены поля индукции неодимового магнита по окружности, поэтому для наиболее рационального использования ресурса магнита следует располагать его в центре сепаратора. Магнитный куб NdFeB размерами 25 мм способны намагничивать эмульсию до насыщения на расстоянии до 25 мм.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОГО МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ПЛАСТОВОЙ ВОДЫ ОТ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЙ

Глава посвящена лабораторным исследованиям по изучению процессов экстракции эмульгированных нефтепродуктов из сточных вод с использованием изготовленного макета магнитного сепаратора и наночастиц магнетита. Среди ранее выделенных параметров особое внимание уделено влиянию размеров частиц, конструкции магнитного поля и компонентного состава вод на эффективность очистки.

4.1 Разработка лабораторного стенда для проведения экспериментальных исследований

Для проведения лабораторных опытов картридж *1* магнитного сепаратора 2 (рисунок 4.1, а, б) был изготовлен из стальных стержней диаметром 1 мм.



1 – стержни картриджа магнитного сепаратора, 2 – магнитный сепаратор, 3 – неодимовые магниты

Рисунок 4.1 – Конструкция макета магнитного сепаратора: а – магнитный сепаратор, б – картридж магнитного сепаратора [38]

Корпус устройства изготовлен из пластикового материала. Внутреннее прямоугольное поперечное сечение корпуса по линии *A–A* сепаратора составляет

27 мм×23 мм, длина 180 мм. На корпусе расположены неодимовые магниты NdFeB 3 кубической формы со стороной 25 мм. Конструкция выбрана в связи с простотой изготовления и предназначена для испытания картриджа магнитного сепаратора.

После сборки макета проведены измерения напряженности магнитного поля от поверхности магнита (0 мм) до центра симметрии корпуса (11,5 мм). Результаты приведены в таблице 4.1. Измерения показали, что индукция магнитного поля внутри сепаратора со стальными стержнями варьирует от 0,20 до 0,61 Тл [38].

Таблица 4.1 – Магнитная индукция в рабочей зоне сепаратора

Расстояние (мм)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11,5
Магнитное поле без ферромагнитных стержней (10^{-1} , Тл)	5,2	4,7	4,13	3,5	3,08	2,67	2,46	2,32	2,13	2,04	2	1,97
Магнитное поле с ферромагнитными стержнями (10^{-1} , Тл)	6,17	5,26	4,6	3,82	3,4	2,95	2,03	2,46	2,33	2,12	2,08	2,04

Исходя из измерений, индукция магнитного поля в рабочей зоне сепаратора наименьшее значение индукции около 0,2 Тл. При таком значении индукции магнитного поля магнетит имеет полное магнитное насыщение.

Для проведения испытаний устройства очистки необходимо оценить скорость потока $v_{пот}$ очищаемой жидкости через ферромагнитный картридж. Обозначив расстояние между стальными стержнями в ферромагнитном картридже через D (рисунок 4.2), можем оценить время экстракции T , необходимое намагниченным эмульсионным каплям, чтобы достичь поверхности стержня и осесть на ней:

$$T = \int_0^{D/2} \frac{dx}{v(x)} \quad (4.1)$$

Где $v(x)$ – функция скорости движения омагниченной глобулы нефти по направлению оси Ox (расстояние до стержня).

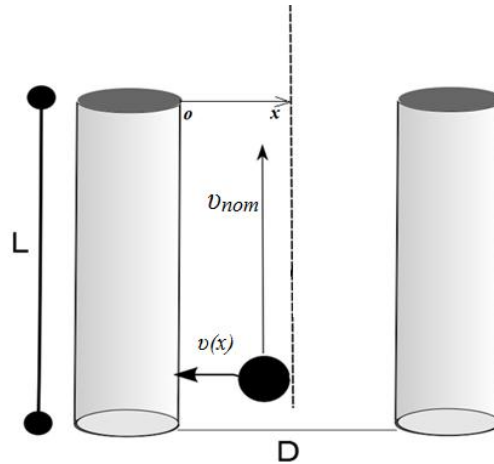


Рисунок 4.2 – Модель движения капли в магнитном сепараторе

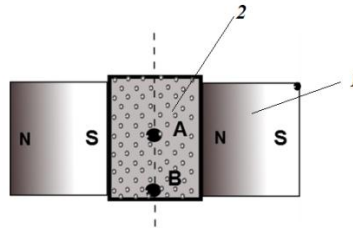
Используя в формуле (4.1) функцию скорости движения омагниченных эмульсий в магнитном поле, получим зависимость времени осаждения T от размеров эмульсионных капель. Зная время T и полезную длину магнитного сепаратора L , можем определить оптимальную скорость потока очищаемой жидкости в зависимости от размеров эмульсионных капель:

$$v_{nom} = \frac{L}{T} \quad (4.2)$$

Для оценки скорости экстракции в предлагаемом устройстве по вышеприведенным формулам примем: динамическая вязкость воды $\eta_d \sim 10^{-3}$ Па·с, коэффициент упаковки магнитных наночастиц на поверхности глобулы нефти $k_s = 0.5$, диаметр частиц эмульсии $d_{эм} = 5-40$ мкм, рабочая длина ферромагнитных стержней в картридже $L = 0,1$ м. Для магнетита величина намагниченности при насыщения $M_p = 4 \cdot 10^5$ А/м.

Для определения градиента магнитного поля dB/dX были экспериментально определены значения индукции на интервале 1 мм, поскольку расстояние между стержнями в упаковке составляет 2 мм.

Показания снимались в точках, где величины индукции магнитного поля имеют наименьшие значения и, следовательно, наименьшую скорость экстракции глобулы нефти. Будем устанавливать оптимальную скорость потока, с учетом скорости движения глобулы нефти в этих точках. В качестве таких точек приняты точки А и В (рисунок 4.3).



1 – магнит NdFeB, 2 – картридж сепаратора
Рисунок 4.3 – Поперечный разрез сепаратора

В таблицах 4.2, 4.3 и на рисунке 4.4 показаны результаты измерений. Погрешность цифрового гауссметра GM2 в условиях, в которых проводились фиксирование показаний, составляет 1%. Для расчета самоиндукции стержня, датчик Холла располагали с противоположной стороны от источника магнитного поля. При этом средние значения величин магнитного поля определялись по существующей лабораторной практике на основе пяти самостоятельных измерений. Расстояние между датчиком Холла и стержнем ограничивалось с помощью диамагнитных пластин толщиной 0,25 мм.

Таблица 4.2 – Значения магнитной индукции в точке А

Расстояние до стержня (мм)	0	0,25	0,5	0,75	1
$B \cdot 10^{-4}$, Тл	2531	2418	2360	2333	2310

Таблица 4.3 – Значения магнитной индукции в точке В

Расстояние до стержня (мм)	0	0,25	0,5	0,75	1
$B \cdot 10^{-4}$, Тл	2417	2298	2262	2241	2240

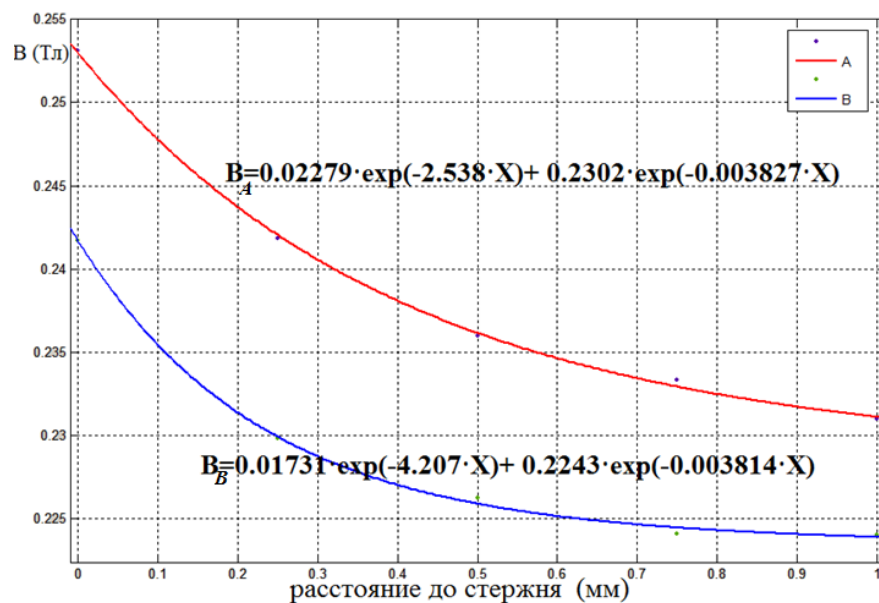


Рисунок 4.4 – Зависимость магнитной индукции от расстояния до стержня в точках А и В

Экспериментальные значения магнитной индукции точки А (таблица 4.2) и В (таблица 4.3) были аппроксимированы аналитической функцией в виде суммы двух экспонент (рисунок 4.4). Наименьшее значение магнитного поля наблюдается в точке В, поэтому оценка скорости извлечения определяется для нее.

Дифференцируем полученную функцию магнитной индукции для определения значения градиента магнитного поля на различных расстояниях от полюса магнита. Подставив его в формулу (3.40), получим окончательно выражение для скорости оседания эмульсионных капель на поверхности ферромагнитных стержней:

$$v(x) = \frac{2kd_{эм}d_{ч}M_{нас}L(z_{ч})}{9\eta}(72.8e^{-4207x} + 0,855e^{-3.8x}), (м/с) \quad (4.3)$$

Оптимальная скорость потока определялась исходя из тех соображений, что внутри сепаратора ламинарное течение, а омагниченная капля эмульсии осядет на стержень раньше, чем преодолет рабочую зону картриджа магнитного сепаратора. Результаты численного расчета в пакете Matlab R2013b приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Результаты моделирования $d_{ch} = 10$ нм

Диаметр эмульсий (мкм)	5	10	20	30	40
Средняя скорость осаждения, мм/мин	10	20	50	70	90
Время осаждения, мин	0,1	0,05	0,02	0,014	0,011
Оптимальная скорость потока жидкости в разделителе, м/ч	60	120	300	428	545

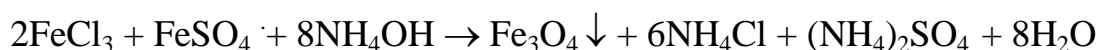
По значениям таблицы 4.4 можно сказать о сильном влиянии размеров глобул нефти на режим работы магнитного сепаратора. При увеличении размеров глобул объемная доля магнитного материала увеличивается. Этот факт положительно влияет на скорость экстракции. Полученные в результате моделирования характеристики потока жидкости в картридже с горизонтальной системой стержней относительно потока дают возможность выбрать оптимальный режим работы предлагаемого магнитного сепаратора (рисунок 4.1)

для проведения эксперимента по очистке нефтепромысловых вод от эмульгированных нефтепродуктов в лабораторных условиях.

4.2 Подготовка магнитных частиц

Для проведения экспериментальной части в данном параграфе представлена методика получения магнитных частиц магнетита с заданным распределением размеров и изучены размеры полученных агрегатов.

В качестве основной химической реакции для получения наночастиц магнетита использовалась реакция Массарта [110]:



На рисунке 4.5 наночастицы магнетита после промывки. Частицы сохранились в дистиллированной воде без стабилизации.



Рисунок 4.5 – Осажденный высокодисперсный магнетит по реакции Massart

В экспериментах осажденный магнетит также применялся без стабилизации. Дело в том, что частицы с заданными размерами, как уже говорилось в разделе 3.1, обладают суперпарамагнитными свойствами. Из-за отсутствия остаточной намагниченности агрегаты образованных частиц имеют меньшую энергию взаимодействия (межмолекулярное и магнитное взаимодействие) при сравнении с более крупными частицами, поэтому агрегаты должны иметь более высокую степень дисперсности.

Для сравнения в опытах будем использовать частицы порошкового (полученного путем механического измельчения) и концентрированного в воде нанодисперсного магнетита, поэтому необходимо исследовать распределение по размерам в каждом из случаев.

Для исследования была выполнена статистическая обработка данных полученных на оптическом микроскопе LEVENHUKD70L. Чувствительность такого микроскопа до 1 мкм, поэтому размер агрегатов характеризуется математическим аппаратом.

По фиксированным участкам фотографии (рисунок 4.6 (а, б)), проводилась выборка по размерам частиц. Результаты представлены в таблицах 4.5 и 4.6.

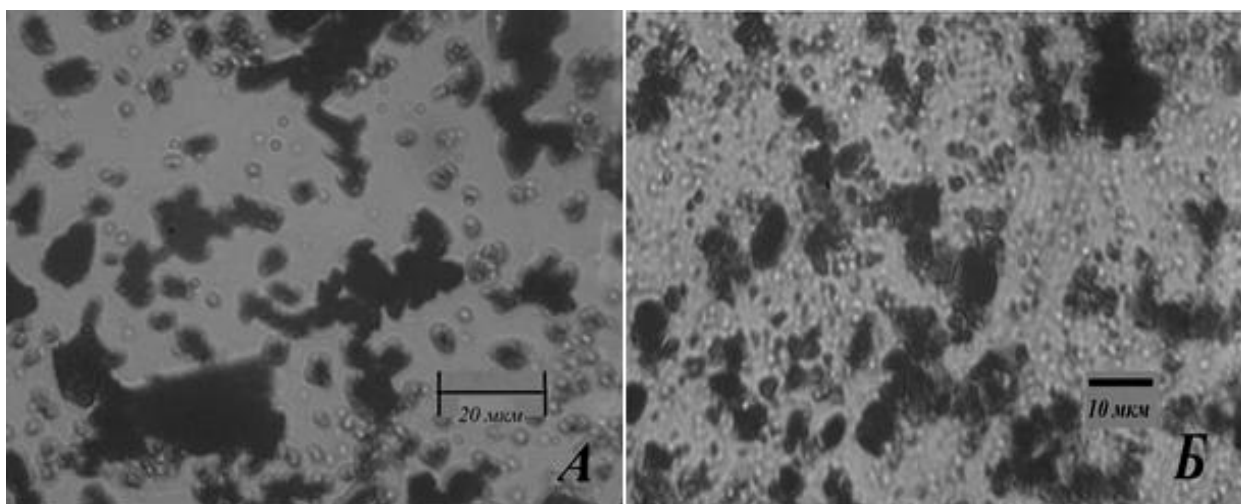


Рисунок 4.6 – Микрофотографии магнитных частиц: а – порошковый магнетит; б – высокодисперсный магнетит

Таблица 4.5 – Распределение размеров в нанодисперсном магнетите (10 нм)

Размер частиц, мкм	1-3	3-5	5-7	7-9
Количество на фиксированной подложке (шт.)	243	52	15	4

Таблица 4.6 – Распределение размеров в порошковом магнетите

Размер частиц, мкм	1-3	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19
Количество на фиксированной подложке (шт.)	70	43	19	17	11	8	7	1	1

Из-за невозможности обнаружения под микроскопом конгломератов, образованных осажденным нанодисперсным магнетитом, размерами менее 1 мкм, распределение интерполируется включительно на интервале от 0,01 до 1 мкм. Для интерполирования функции плотности использовалось логнормальное распределение. Программа для интерполирования, выполненная в пакете MatlabR

2013b представлена в Приложении 1. Результаты расчетов представлены на рисунках 4.7 и 4.8.

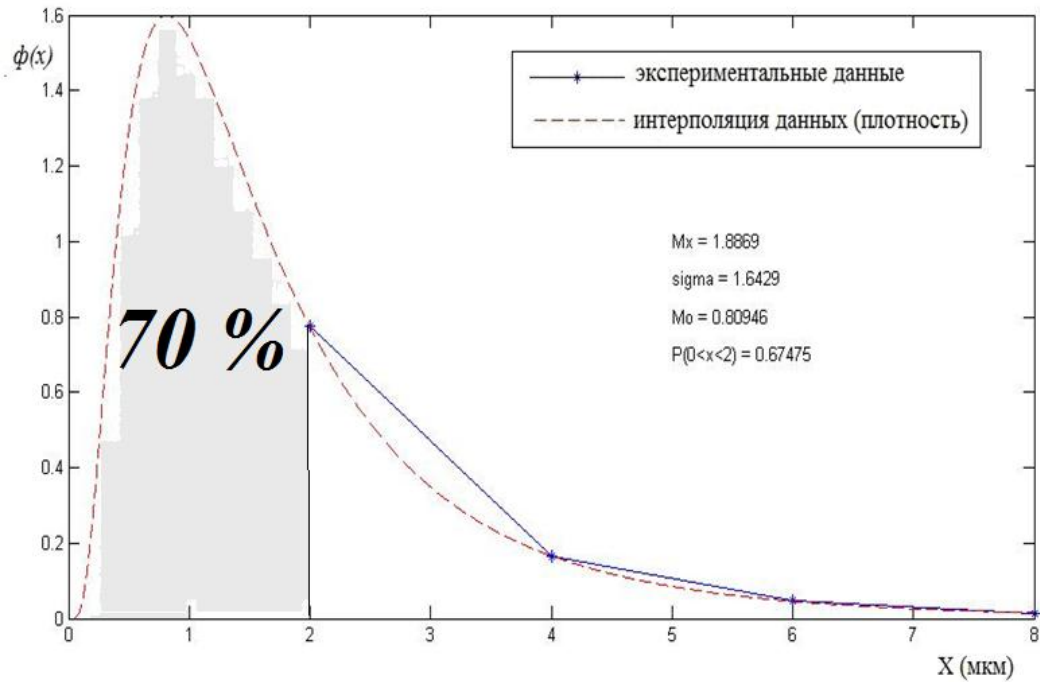


Рисунок 4.7 – Эмпирическое и логнормальное распределение частиц нанодисперсного магнетита в воде

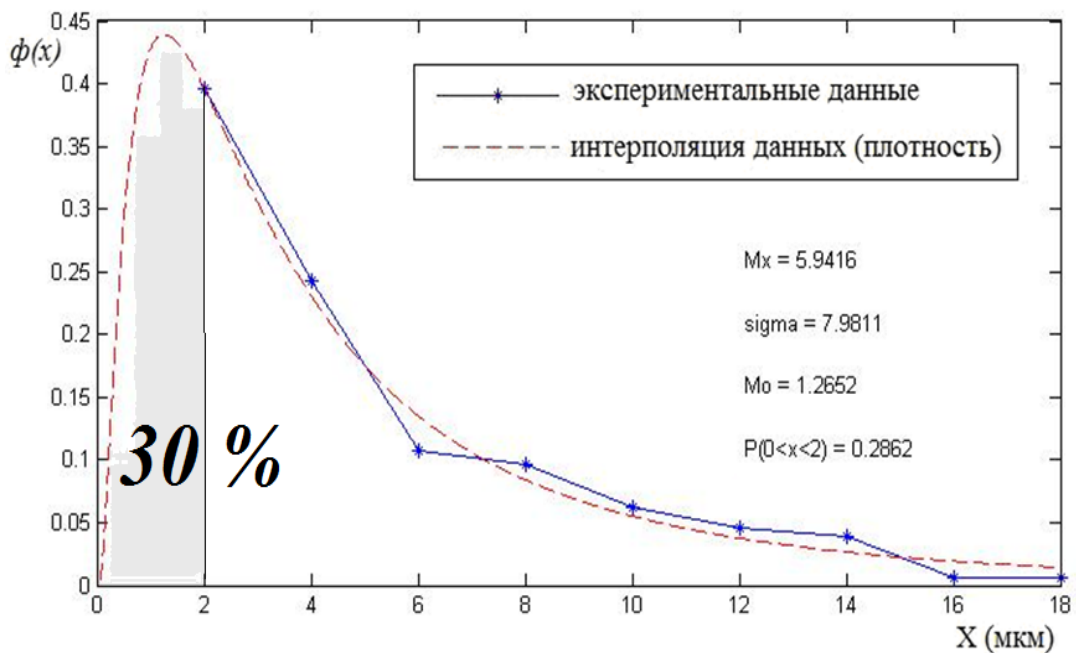


Рисунок 4.8 – Эмпирическое и логнормальное распределение частиц сухого магнетитового порошка в воде

Согласно выполненному интерполированию наибольшая частота (максимум функции плотности) для осажденного высокодисперсного магнетита составила $x=0,8$ мкм, для порошкового магнетита $x=1,27$ мкм. Ожидаемый средний размер

для высокодисперсного магнетита составил $Mx=1,9$ мкм, для сухого порошкового магнетита $Mx=5,9$ мкм. В работе [123] было показано, что твердые частицы размерами менее 2 мкм применялись для изготовления эмульсий. Такие твердые частицы хорошо сорбировались на поверхности эмульсии нефти, стараясь занять пограничный слой. Магнетит, полученный путем химической конденсации, (рисунок 4.7) содержит частиц с размерами меньше 2 мкм около 70 %, магнетитовый порошок, полученный измельчением (рисунок 4.8) около 30%. Таким образом, нанодисперсный магнетит должен обладать лучшей эффективностью очистки.

Частицы нанодисперсного магнетита после проведения эксперимента извлекались из водной суспензии, высушивались и исследовались на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega III SBU института химии Коми научного центра УрО РАН. Результаты исследования приведены на рисунке 4.9.

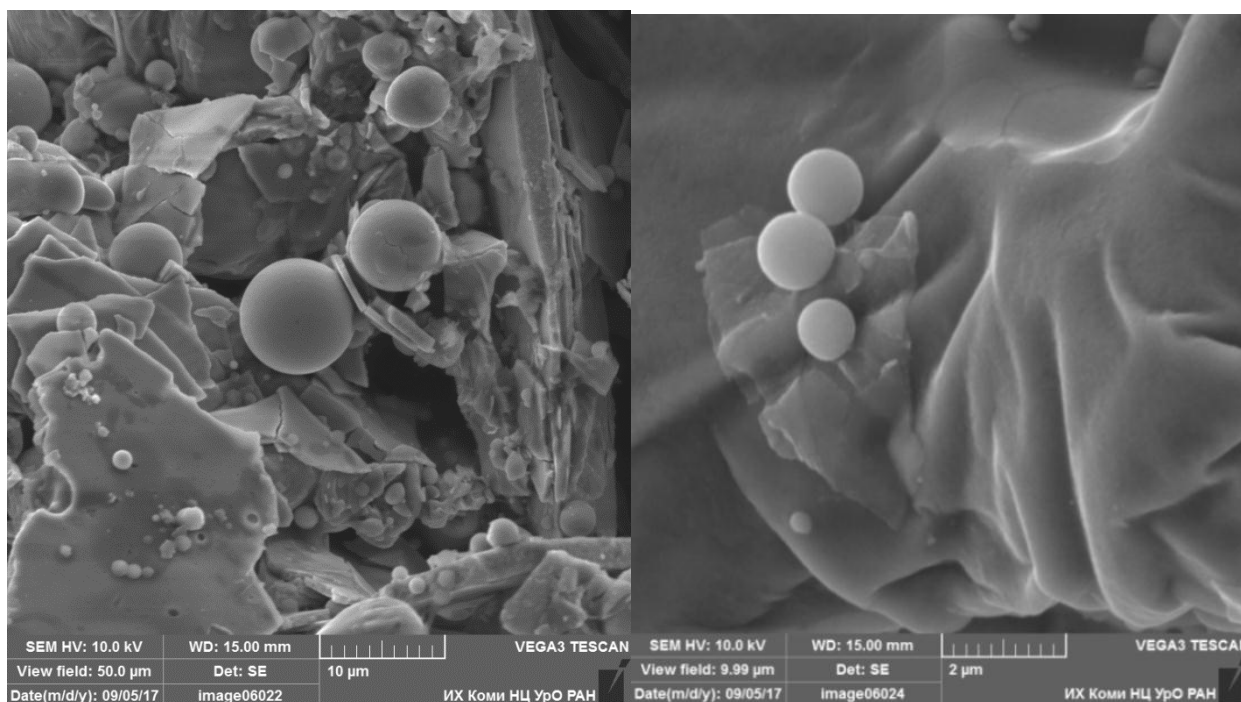


Рисунок 4.9 – Фотография образца высушенных агрегатов магнитных частиц, извлеченных из водной суспензии

По фотографиям можно увидеть образование сферических структур магнетитовой и нефтяной смеси, в виде сферических капсул глобул нефти.

4.3 Результаты лабораторных экспериментов по очистке пластовых вод

Эксперименты проводились с той целью, чтобы установить оптимальные концентрации для нанодисперсного магнетита частиц, и определить эффективность очистки пластовой воды от эмульгированной нефти.

Ниже показаны результаты экспериментов, которые проводились с пластовыми водами Ярегского и Нижнечутинского месторождения. Пробы вод отбирались в соответствии с ГОСТ 17.1.4.01-80 из резервуаров-отстойников после прохождения стадии отделения нефти и воды. В качестве ферромагнитных сорбентов были использованы в дозированной концентрации сухой магнетитовый порошок и нанодисперсные частицы магнетита. Во всех экспериментах образцы пластовых вод смешивались с дозированной концентрацией таких частиц (рисунок 4.10) и пропускались через магнитный сепаратор (рисунок 4.1).



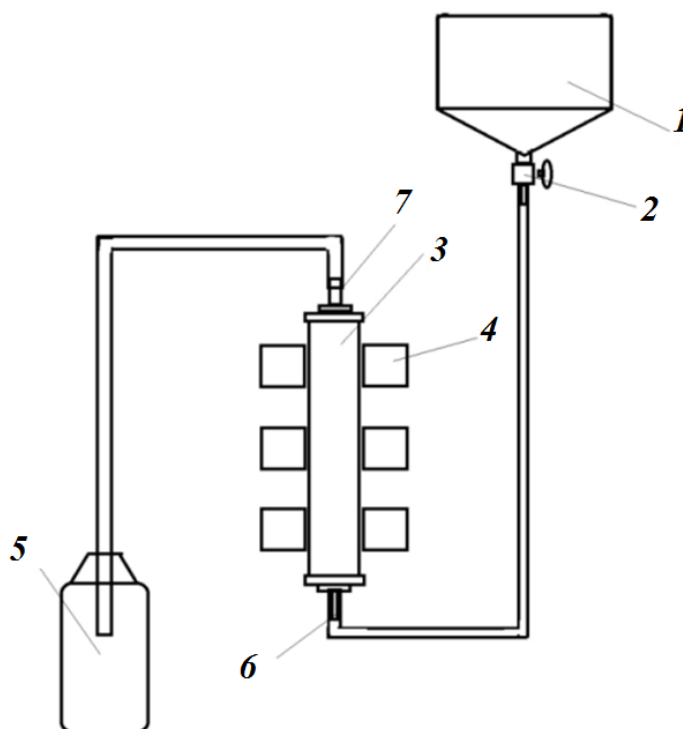
Рисунок 4.10 – Суспензия пластовой воды с дозированной концентрацией нанодисперсного магнетита

В процессе такой обработки во всех экспериментах наблюдалось не только понижение остаточного содержания нефтепродуктов, но и визуально наблюдалось осветление исходного образца. На рисунке 4.11 показаны этапы эксперимента до (рисунок 4.11, А) и после пропускания через магнитный сепаратор (рисунок 4.11, Б).



Рисунок 4.11 – Пропускание через магнитный сепаратор: А – до обработки, Б – после обработки

После обработки пробы на лабораторном стенде (рисунок 4.12) были исследованы в лабораториях ООО «Икос» и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в РК в городе Ухте». Акты выполненных работ и протокола результатов исследования находятся в Приложении 3. Нанодисперсный магнетит сравнивался с сухим магнетитовым порошком, полученным путем измельчения в ступке.



1 – емкость для смешивания частиц и нефти, 2 - отводящий патрубок с краном для регулировки скорости потока, 3 – магнитный сепаратор, 4 – магнит NdFeB, 5 – емкость очищенной жидкости, 6 – патрубок входа в магнитный сепаратор, 7 – патрубок выхода из магнитного сепаратора

Рисунок 4.12 – Лабораторный стенд

Эксперимент проводился с нанодисперсным магнетитом на стенде (рисунок 4.12) с образцом пластовой воды с Нижнечутинского месторождения. Пробы воды обрабатывались в различных концентрациях магнетита. После смешивания частиц магнетита в пластовой воде и ожидания в течение 10 минут, прогоняли через магнитный сепаратор (Рисунок 4.12). На основе результатов расчетов представленных в таблице 4.4, скорость течения воды в сепараторе была

установлена ≈ 60 м/ч. Влияние концентрации магнетита на остаточное содержание нефтепродуктов приведено в таблице 4.7 и рисунке 4.13.

Таблица 4.7 – Результаты эксперимента с сухим порошковым магнетитом ($M(x)=5,9$ мкм).

Концентрация магнетита (мг/л)	0	100	500	1000
Остаточная концентрация нефтепродуктов (мг/л)	8,03±2,01	2,03±0,51	1,25±0,31	1,02±0,26

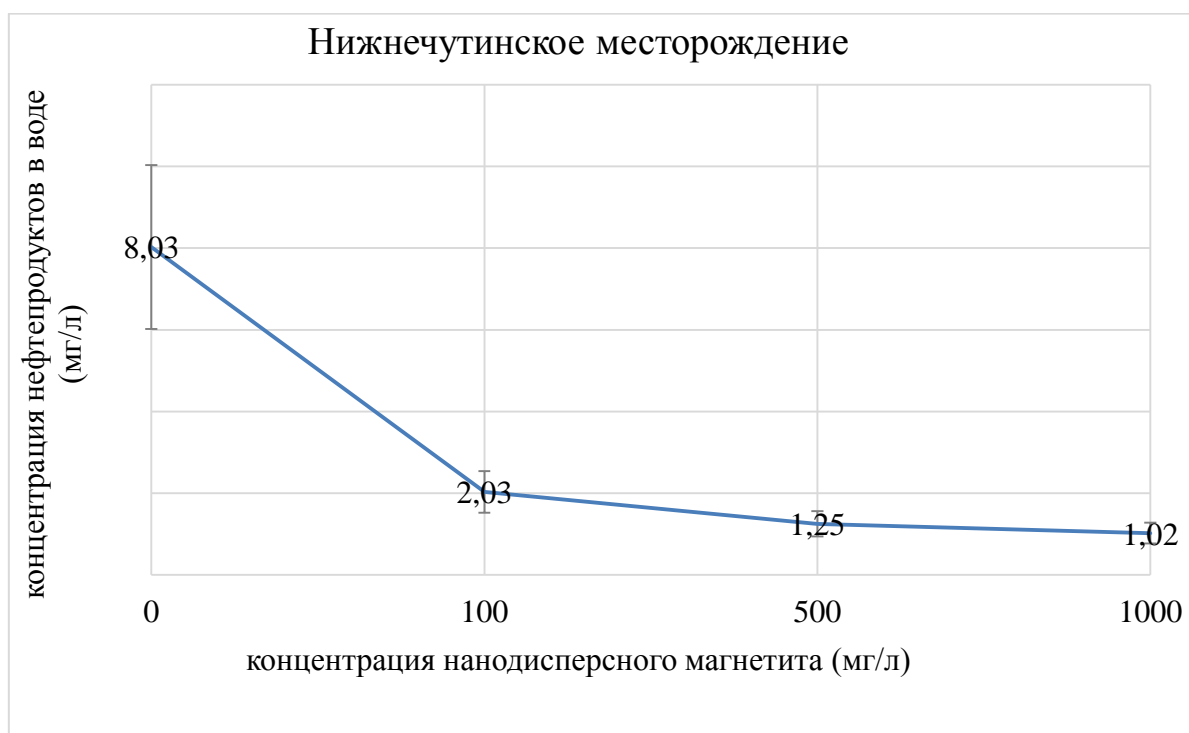


Рисунок 4.13 – Влияние массовой концентрации нанодисперсного магнетита на остаточное содержание нефтепродуктов

Существенное уменьшение концентрации нефти наблюдалось при массовой концентрации до 100 мг/л.

Следующий эксперимент проводился с нанодисперсными частицами магнетита, осажденные по методике Массарта. Водянистый раствор нанодисперсного магнетита смешивался в емкости объемом 1 л. пластовой воды с Ярегского месторождения. Исходный образец имел мутный окрас, что свидетельствовало о сильной минерализации воды [36]. Результаты приведены в таблице 4.8 и на рисунке 4.14.

Таблица 4.8 - Результаты эксперимента с нанодисперсным магнетитом

Массовая концентрация магнетита (мг/л)	0	2	21,3
Остаточная концентрация нефтепродуктов (мг/л)	37,16±9,29	15,52±3,88	9,8±2,45

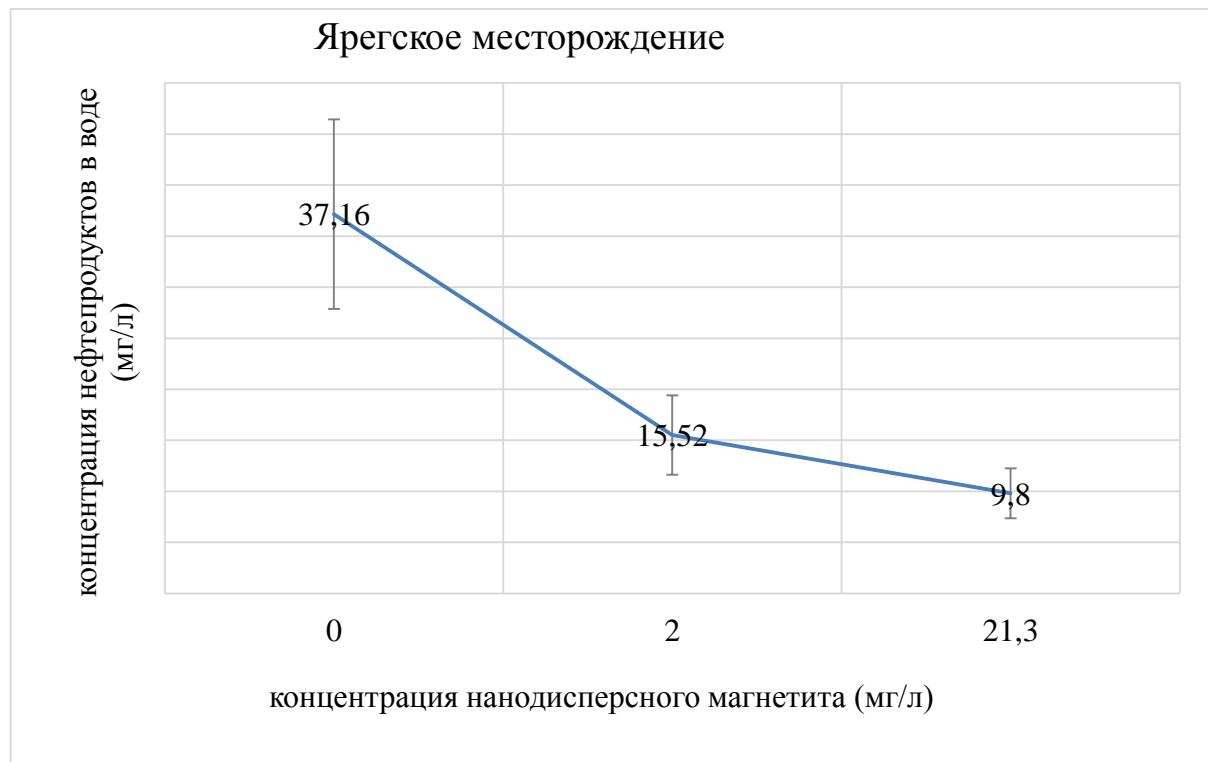
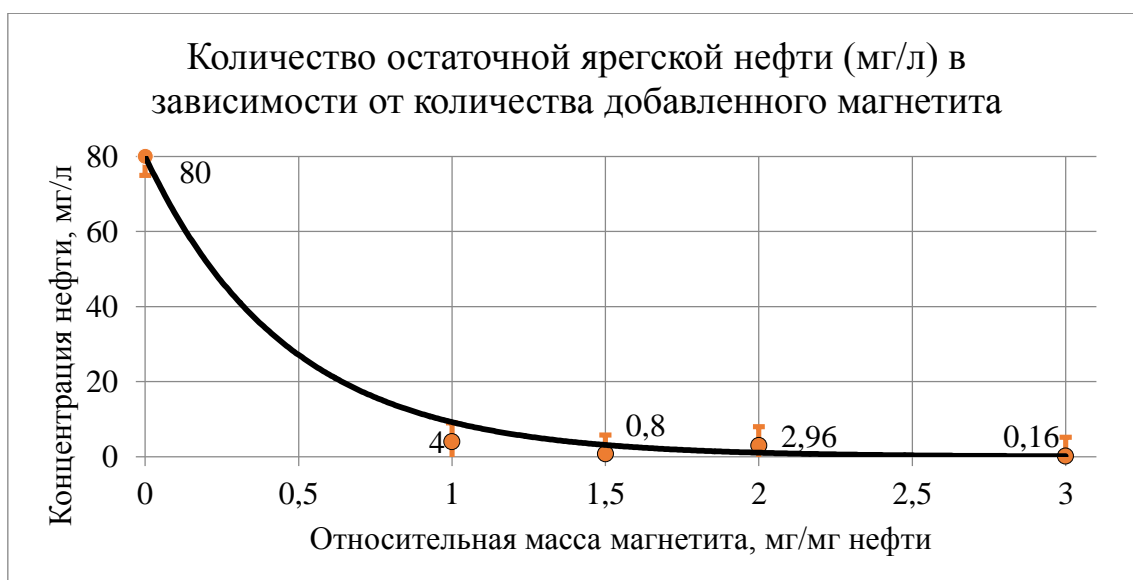


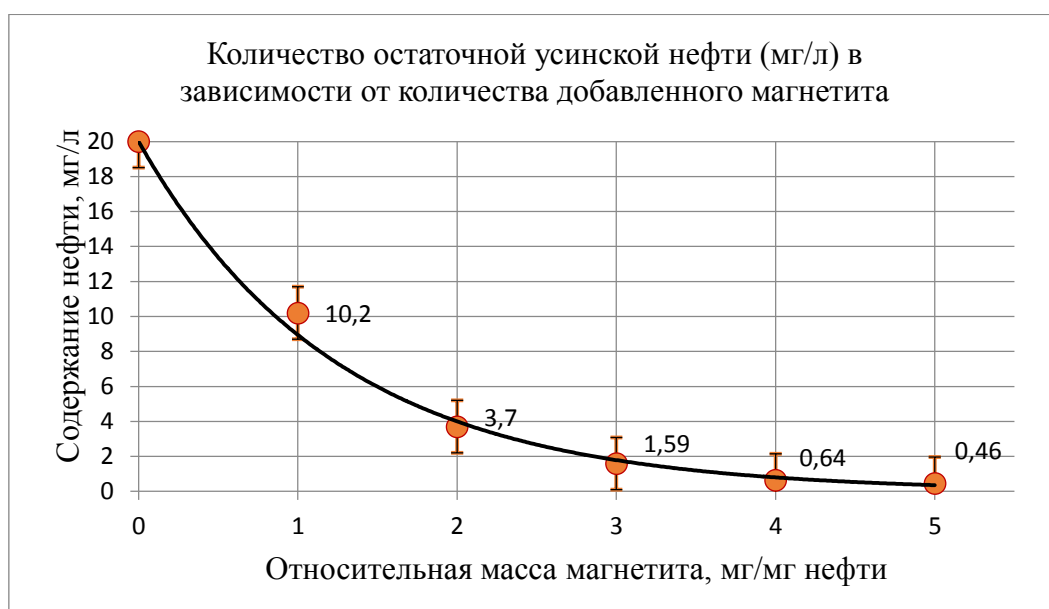
Рисунок 4.14 – Влияние массовой концентрации нанодисперсного магнетита на остаточное содержание нефтепродуктов

При относительно малых концентрациях магнитных частиц (порядка 2 мг/л) остаточное содержание нефтепродуктов снизилось более чем в 2 раза.

Была выполнена серия экспериментов по очистке пластовой воды из резервуара отстойника Ярегского и Усинского месторождения от нефтепродуктов с использованием нанодисперсного магнетита при более высокой концентрации. В этих испытаниях для оценки эффективности извлечения нефти из воды использовали однолучевой сканирующий спектрофотометр. Экстракцию органических компонентов загрязненной воды проводили при помощи толуола. На приборе определяли такие характеристики экстракта, как оптическая плотность и процент светопропускания. Результаты представлены на рисунке 4.15.



а



б

Рисунок 4.15 – Графики зависимости содержания остаточной нефти от массового соотношения “нефть-магнетит” в разделяемой смеси

В серии экспериментов (рисунок 4.15) с образцами пластовых вод Ярегского месторождения с содержанием нефтепродуктов более 100 мг/л показал, что доведение до остаточного содержания менее 5 мг/л возможно при 1,5 или 2-ух кратном избытке массы по сравнению с массой нефти. Обосновывать эффективность очистки для тяжелой нефти Яреги можно тем, что содержание в пограничном слое большого количества гидрофильных молекул, обеспечивает лучшее сцепление наночастиц магнетита с поверхностью нефтяных капель.

На рисунке 4.15 б представлены результаты экспериментов с образцами пластовых вод Усинского месторождения. При более чем 2-ух кратном избытке массы магнетита наблюдается снижение остаточного содержания нефтепродуктов ниже 5 мг/л.

Следующий эксперимент при тех же условиях с пластовой водой, отобранной из РВС Нижнечутинского месторождения. И далее испытывался на лабораторном стенде. Результаты эксперимента приведены в таблице 4.9. Все 3 пробы пропускались через магнитный сепаратор при различных концентрациях магнетита от 0 до 100 мг/л. Результаты анализа показывают, что эффект от очистки наблюдается при концентрациях магнетита больше 100 мг/л. Ниже этой планки наблюдается незначительное уменьшение концентрации нефти в воде.

Таблица 4.9 - Результаты эксперимента с нанодисперсным магнетитом

Массовая концентрация магнетита (мг/л)	0	41	100
Остаточная концентрация нефтепродуктов (мг/л)	41 ±10,2	37,9 ±9,5	16,3 ±4,1



Рисунок 4.16 - Влияние массовой концентрации нанодисперсного магнетита на остаточное содержание нефтепродуктов

Пластовая вода, отобранная из РВС Нижнечутинского месторождения, испытывалась сухим порошком магнетита со средним размером частиц 5,9 мкм и нанодисперсным магнетитом при одинаковых условиях. В таблице 4.10 и на рисунке 4.17 собраны результаты испытаний.

Таблица 4.10 - Результаты эксперимента доочистки пластовой воды с нанодисперсным магнетитом и порошковым магнетитом

Массовая концентрация магнетита (мг/л)	0	50	140	500
Остаточная концентрация нефтепродуктов (мг/л) после обработки нанодисперсным магнетитом	21,1±5,3	12,5±3,1	9,0±2,3	4,8±1,2
Остаточная концентрация нефтепродуктов (мг/л) после обработки порошковым магнетитом	21,1±5,3	-	12,3±3,1	8,9±2,2

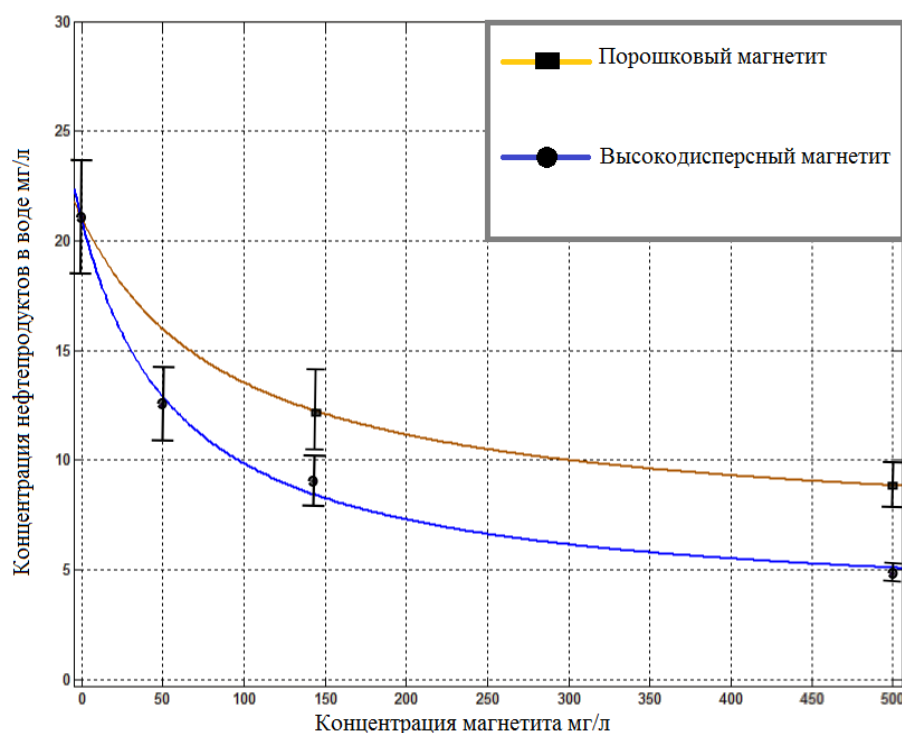


Рисунок 4.17 - Влияние массовой концентрации нанодисперсного и порошкового магнетита на остаточное содержание нефтепродуктов

Эффективность применяемого сорбента можно оценить по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{C_u - C_{\text{вых}}}{C_u} \cdot 100\%, \quad (4.4)$$

где C_u – исходная концентрация нефтепродуктов в воде, $C_{вых}$ – концентрация нефтепродуктов после очистки.

При одинаковых концентрациях сорбента 500 мг/л для сухого порошкового магнетита эффективность очистки составила 57%, для нанодисперсного магнетита эффективность составила 77%. Таким образом, нанодисперсный магнетит показал при одинаковых условиях эффективность очистки на 20 % выше.

Резюмируя, в серии экспериментов с образцами пластовых вод Ярегского месторождения с содержанием нефтепродуктов более 100 мг/л показал, что доведение до остаточного содержания менее 5 мг/л возможно при 1,5 или 2-ух кратном избытке массы по сравнению с массой нефти. Обосновывается эффективность очистки для тяжелой нефти Яреги тем, что содержание в пограничном слое большого количества гидрофильных молекул, обеспечивает лучшее сцепление наночастиц магнетита с поверхностью нефтяных капель. В то время как с образцами нефти Усинского и Нижнечутинского месторождения потребовался избыток магнетита не менее, чем в пять раз по отношению к исходному загрязнению. Нефть Усинского месторождения характеризуется преимущественным содержанием алканов и гидрофобных циклов и низким содержанием функциональных соединений, что уменьшает цепные свойства в пограничном слое. В экспериментах для доведения остаточного содержания нефтепродуктов к нижней границе отраслевого стандарта (ОСТ 39-225-88) 5 мг/л, концентрация нанодисперсного магнетита составляла от 20 до 500 мг/л. Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что при таких условиях остаточное количество нефтепродуктов в пластовой воде после пропускания через магнитный сепаратор составило 3-7 мг/л с доверительной вероятностью 0,95.

4.4 Оценка эффективности способа очистки по эффективности

В ранее предложенной формуле 3.40, скорость извлечения омагниченной глобулы нефти зависит от параметра $k(C,P)$ – упаковки магнитных частиц. Этот параметр зависит от концентрации магнитных частиц C и сорбционной

способности P . Таким образом, необходимо установить оптимальную концентрацию магнитных наночастиц, при котором будет получена наибольшая эффективность очистки, отвечающая критериям качества очистки F_1 и скорости очистки с учетом экономической целесообразности F_2 :

$$F = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 \rightarrow \max \quad (4.5)$$

Для этого **на первом этапе** необходимо провести первичные испытания нанодисперсного магнетита или другого магнитного сорбента при различных концентрациях. Таким образом, мы оцениваем эффективность очистки по критерию F_1 и устанавливаем сорбционную способность применяемого магнетита.

Для примера рассмотрим первичные испытания, проведенные с пластовыми водами Нижнечутинского месторождения, с применением порошкового магнетита ($M(x)=5.9$ мкм) и нанодисперсного магнетита $d_q=10$ нм при различных концентрациях. Визуализация массива данных экспериментов представлена на рисунке 4.18.

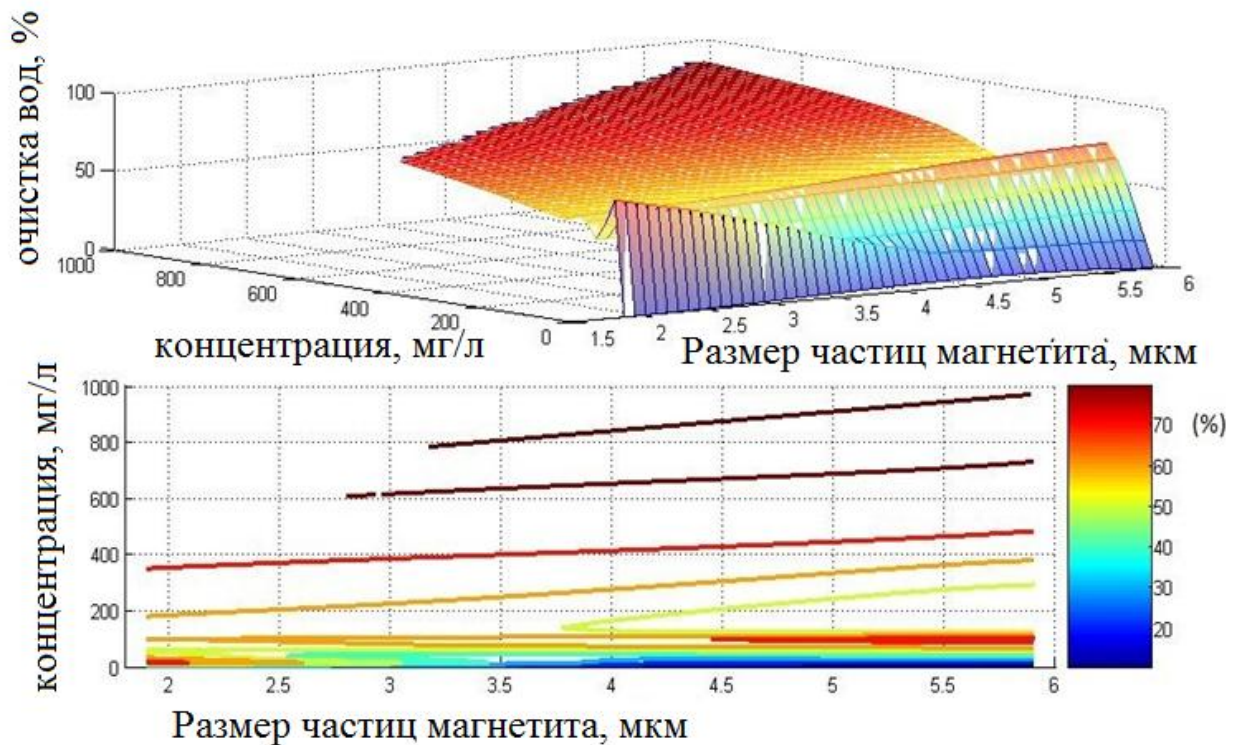


Рисунок 4.18 – Остаточное содержание нефтепродуктов в пластовой воде Нижнечутинского месторождения после обработки частицами магнетита различных размеров.

В формуле 3.40 скорость движения эмульсионной сильно зависит от коэффициента упаковки $k(C, P)$, который, помимо сорбционной способности P , так же зависит от концентрации магнитных частиц C . Необходимо найти минимально необходимую концентрацию частиц, при котором критерий скорости будет полностью насыщен. Иначе говоря, попытаемся оптимизировать коэффициент упаковки $k(C, P)$ при оптимальных концентрациях. Таким образом, для каждой монодисперсной системы магнитных частиц установим оптимальную концентрацию по второму критерию – скорости очистки с учетом экономической целесообразности:

$$F_2 = (d_{мч}, C) \rightarrow \max. \quad (4.6)$$

Второй критерий определим двумя правилами:

1. Повышение концентрации целесообразно до определенного значения $C_{онм}$, что положительно будет сказываться на скорости извлечения:

$$F_2 = C_i / C_{онм} \text{ при } C_i \leq C_{онм}; \quad (4.7)$$

2. Условие $C_i > C_{онм}$ экономически целесообразно, поэтому определим критерий на этом полуинтервале выражением:

$$F_2 = C_{онм} / C_i. \quad (4.8)$$

Для определения оптимальных концентраций магнитных частиц составим модель сорбции на поверхности эмульсионной капли, исходя из отношения площади поверхности эмульсионной капли к площади проекции магнитной частицы на нее.

Обычно количественное содержание нефтепродуктов в пластовых водах определяется концентрацией $C_{неф}$. Таким образом, с учетом плотности нефти и концентрации нефтепродуктов на выходе РВС общий объем эмульсий в объеме воды V можно задать:

$$V_{о.эм} = \frac{VC_{неф}}{\rho_{неф}}, \quad (4.9)$$

где $\rho_{неф}$ – плотность нефти.

Количество сферических эмульгированных капель нефти размером $d_{эм}$:

$$K_{эм} = \frac{6 \cdot V_{0.эм}}{\pi \cdot d_{эм}} \quad (4.10)$$

Суммарную площадь поверхности эмульсионных капель определим, как произведение площади поверхности капель на количество глобул:

$$S_{эм} = \pi \cdot d_{эм}^2 \cdot K_{эм} \quad (4.11)$$

Количество магнитных частиц, исходя из отношения суммарной площади поверхности эмульсионной капли к площади проекции частиц с размерами $d_{м.ч.}$:

$$K_{м.ч.} = \frac{4 \cdot d_{эм}^2 \cdot K_{эм}}{d_{мч}^2} \quad (4.12)$$

Требуемый объем магнитных частиц определяется, как произведение общего числа частиц на его элементарный объем:

$$V_{о.м.ч} = \frac{K_{м.ч.} \cdot \pi \cdot d_{мч}^3}{6} \quad (4.13)$$

Оптимальна концентрация магнитных частиц:

$$C_{опт} = \frac{K_{м.ч.} \cdot \pi \cdot d_{мч}^3 \cdot \rho_{маг}}{6} \quad (4.14)$$

где $\rho_{маг}$ – плотность магнетита.

С учетом формул 4.14, 4.10 и 4.9 получим:

$$C_{опт} = \frac{4 \cdot d_{эм} \cdot d_{мч} \cdot \rho_{маг} \cdot C_{неф}}{\rho_{неф}} \quad (4.15)$$

Таким образом, **на втором этапе** необходимо получить сведения о свойствах пластовой воды: плотности нефти $\rho_{неф}$ концентрации нефти, $C_{неф}$, средний размер глобул нефти $d_{эм.к.}$ К примеру, остаточное содержание нефтепродуктов в пластовой воде из РВС Нижнечутинского месторождения не превышал $C_{неф}=50$ мг/л. Примем размер глобул нефти $d_{эм}=10$ мкм и $\rho_{неф}=876$ кг/м³. С учетом начальных данных оценим эффективность очистки по критерию скорости очистки с учетом экономической целесообразности по правилу 4.6 и 4.7 (рисунок 4.19).

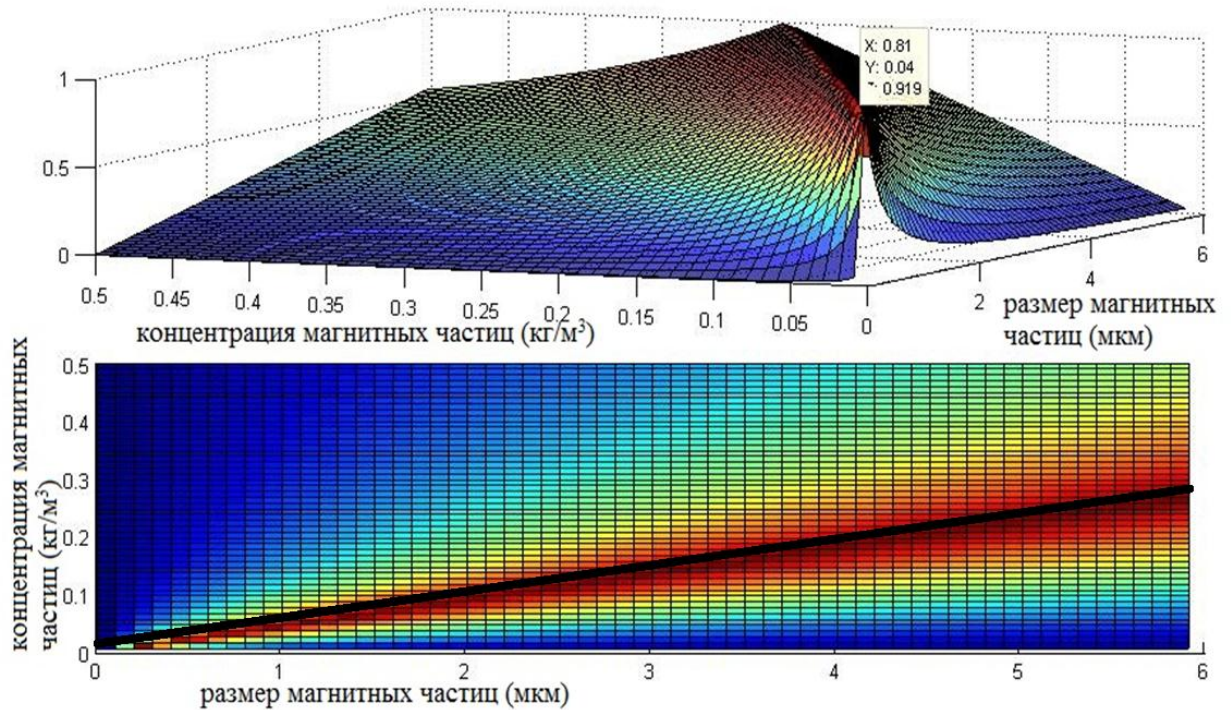


Рисунок 4.19 – Оценка эффективности очистки критерию скорости очистки с учетом экономической целесообразности.

По рисунок 4.19 видно, какую концентрацию магнитных частиц нужно использовать при соответствующих размерах коллоидов сорбента. При концентрации в пластовой воде эмульгированной нефти 50 мг/л теоретически необходимая концентрация, рассматриваемых магнитных наночастиц магнетита, составляет около 20 мг/л.

Объединив экспериментальные и теоретические данные, устанавливаем оптимальную концентрацию магнитных наночастиц при котором будет получена наибольшая эффективность очистки, отвечающая критериям качества очистки F_1 и скорости очистки с учетом экономической целесообразности F_2 . На рисунке 4.20 предложен алгоритм для определения оптимальной концентрации магнитных наночастиц. С помощью этого алгоритма, имея сведения о составе пластовой воды и первичных испытаниях, для каждой монодисперсной системы магнитных частиц предлагается установить оптимальную концентрацию.

Значимость критериев эффективности определяется весами: K_1 – степени очистки и K_2 – скорости очистки.

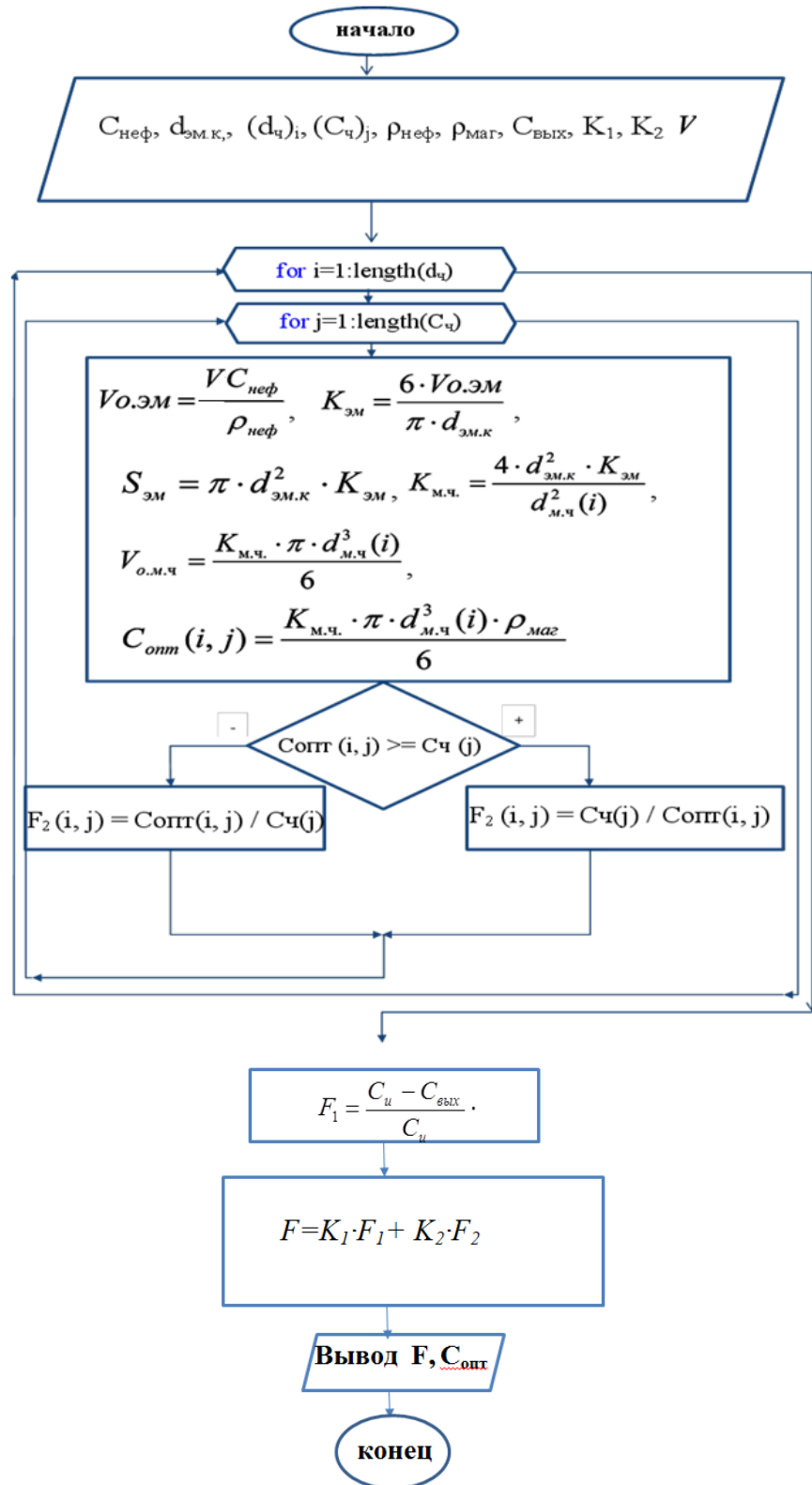


Рисунок 4.20 – Блок-схема алгоритма оценки оптимальной концентрации нанодисперсного магнетита

Результаты расчетов приведены на рисунке 4.21. Алгоритм реализован в пакете Matlab.

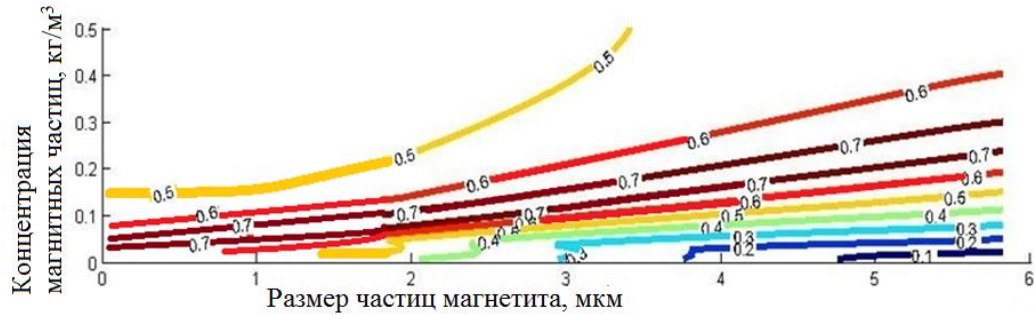
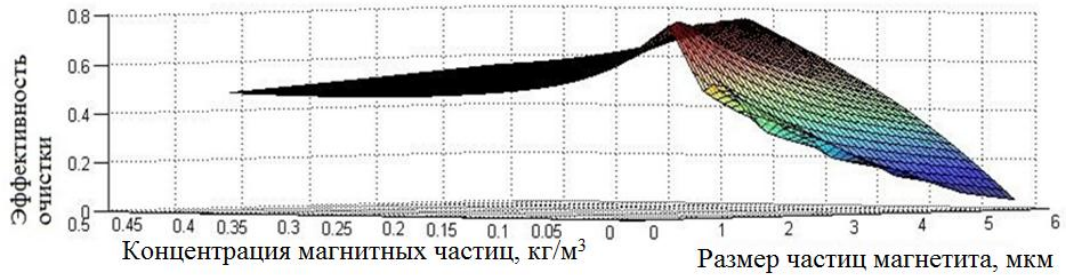
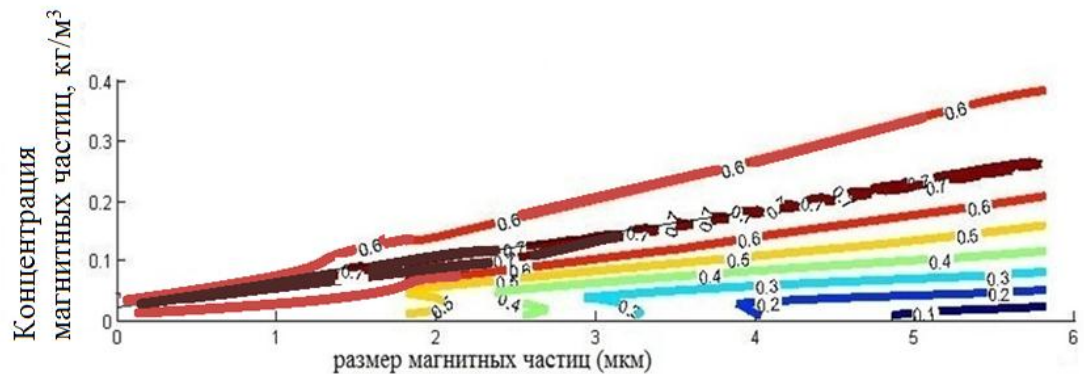
а) $K_1 = 0,5; K_2 = 0,5$.б) $K_1 = 0,6; K_2 = 0,4$.

Рисунок 4.21 – Оценка целевой функции по заданным критериям эффективности (K_1 – вес степени очистки, K_2 – вес скорости очистки за счет выбора оптимальных концентраций магнитных частиц).

При равных значениях весов $K_1=K_2=0,5$, для очистки пластовых вод Нижнечутинского месторождения магнитные наночастицы магнетита следует использовать в концентрации от 40 мг/л. При большем значении первого критерия эффективности (степень очистки) концентрацию следует увеличивать.

Программу можно применять для различных месторождений, определив нужные значения управляемым параметрам. С учетом теоретических и экспериментальных результатов, можно управлять процессом очистки, задавая нужные веса либо скорости, либо степени очистки.

Выводы по главе

Разработан лабораторный макет магнитного сепаратора и проведены расчеты для установления режима работы.

Экспериментальный образец магнитного сепаратора показал возможность применения картриджа с продольным расположением стержней относительно потока, имеющую ромбовидную геометрию по отношению к силовым линиям магнитного поля, для очистки пластовой воды от эмульгированных нефтепродуктов.

При одинаковых условиях нанодисперсный магнетит показал эффективность очистки на 20 % выше по сравнению с сухим магнетитовым порошком со средним размером гранул 1,9 мкм, что говорит о влиянии размера магнитных частиц на их активность в пограничном слое нефти и воды.

Большое внимание необходимо уделять более детальному изучению компонентов очищаемых вод. Сильная минерализация очищаемой пластовой воды препятствует адсорбции частиц магнетита. Как известно, мелкодисперсные твердые частицы способны как стабилизировать эмульсии, так и ослаблять их стабильность [123]. Таким образом, примеси, находящиеся в пластовой воде, также обволакивают эмульсию нефти, препятствуя магнитным частицам сорбироваться на асфальтеновой пленке.

При помощи экспериментов также было определено, что частицами магнетита можно извлекать эмульгированные нефтепродукты, но мало эффективен при извлечении сильно стабильными эмульсиями и водорастворимой фракции.

В серии экспериментов с образцами пластовых вод Ярегского месторождения с содержанием нефтепродуктов более 100 мг/л показал, что доведение до остаточного содержания менее 5 мг/л возможно при 1,5 или 2-ух кратном избытке массы по сравнению с массой нефти. Обосновывается эффективность очистки для тяжелой нефти Яреги тем, что содержание в пограничном слое большого количества гидрофильных молекул, обеспечивает лучшее сцепление наночастиц магнетита с поверхностью нефтяных капель. С

образцами нефти Усинского и Нижнечутинского месторождения потребовался избыток магнетита не менее, чем в пять раз по отношению к исходному содержанию нефтепродуктов.

В экспериментах для доведения остаточного содержания нефтепродуктов к нижней границе отраслевого стандарта (ОСТ 39-225-88) 5 мг/л, концентрация нанодисперсного магнетита составляла от 20 до 500 мг/л. Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что при таких условиях остаточное количество нефтепродуктов в пластовой воде после пропускания через магнитный сепаратор составило 3-7 мг/л с доверительной вероятностью 0,95.

Предложена методика оценки оптимальной концентрации нанодисперсного магнетита при очистке пластовой воды от эмульгированной нефти, основанная на критериях степени и скорости очистки, которая определяется исходя из экономической эффективности.

5. МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОГО МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОДИСПЕРСНОГО МАГНЕТИТА

В главе выполнено моделирование магнитных полей магнитного сепаратора. Предложены конструкции магнитных сепараторов с продольным расположением стержней относительно потока для очистки пластовой воды от эмульгированной нефти с применением нанодисперсных частиц магнетита. Разработана методика проектирования магнитного сепаратора.

5.1 Выбор оптимальных параметров магнитного сепаратора

Дальность действия магнитов NdFeB, при котором индукция магнитного поля выше 0,12 Тл, можно считать, приблизительно равен линейному размеру соответствующего магнита (рисунок 5.1).

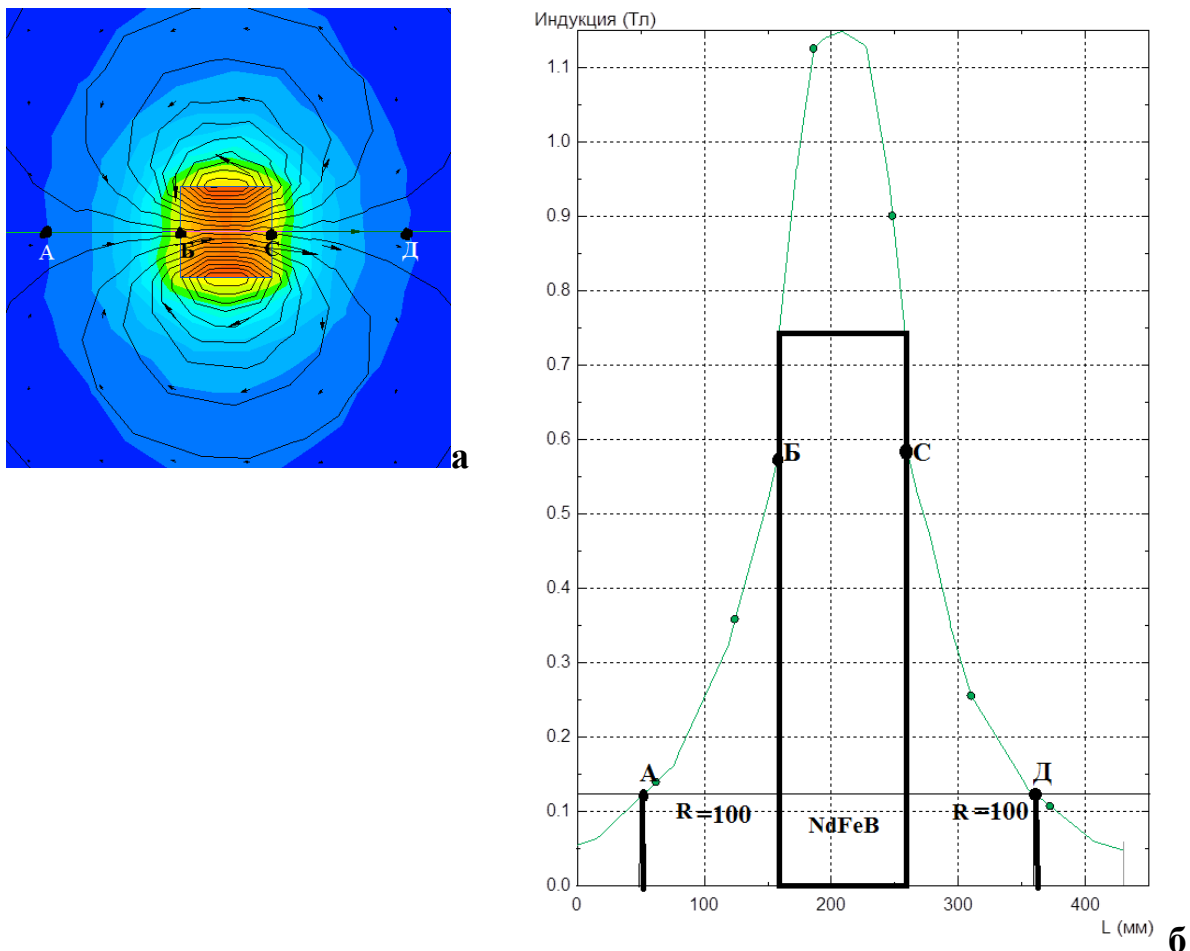
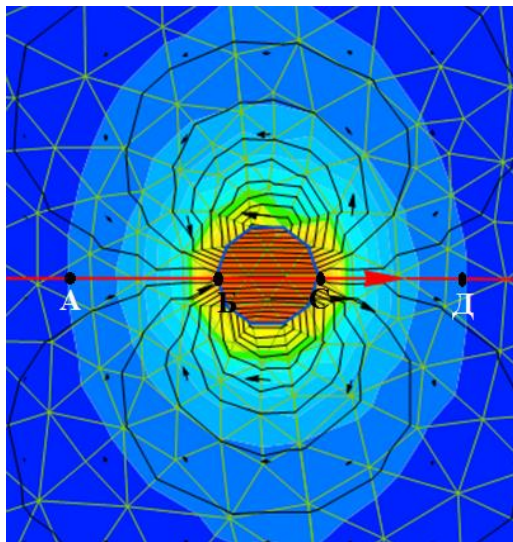


Рисунок 5.1 – Магнитное поле магнитного стержня с квадратным основанием (сторона 100 мм), радиус действия магнитов $R = 100$ мм: а – Расчет магнитного поля; б – График индукции магнитного поля вблизи полюсов.

Радиусом действия магнитов считаем длину отрезка проекции точек АБ и СД на ось Ox . Для параллелепипеда NdFeB с квадратным основанием со стороной 100 мм (рисунок 5.1), индукция 0,12 Тл фиксируется на дистанции также около 100 мм. В конструкции магнитного сепаратора можно использовать в качестве сердечника магнитные стержни другой формы, например в форме круглого цилиндра (рисунок 5.2). Радиус действия будет такой же, как и диаметр стержня. Основное различие в том, что при использовании круглого стержня (рисунок 5.2) на дистанции около 20 мм до магнита фиксируются более высокий градиент магнитного. При этом на расстоянии 20-70 мм у сердечника с квадратным основанием индукция выше (рисунок 5.1), поэтому такой сердечник лучше подойдет для намагничивания ферромагнитного картриджа.



а

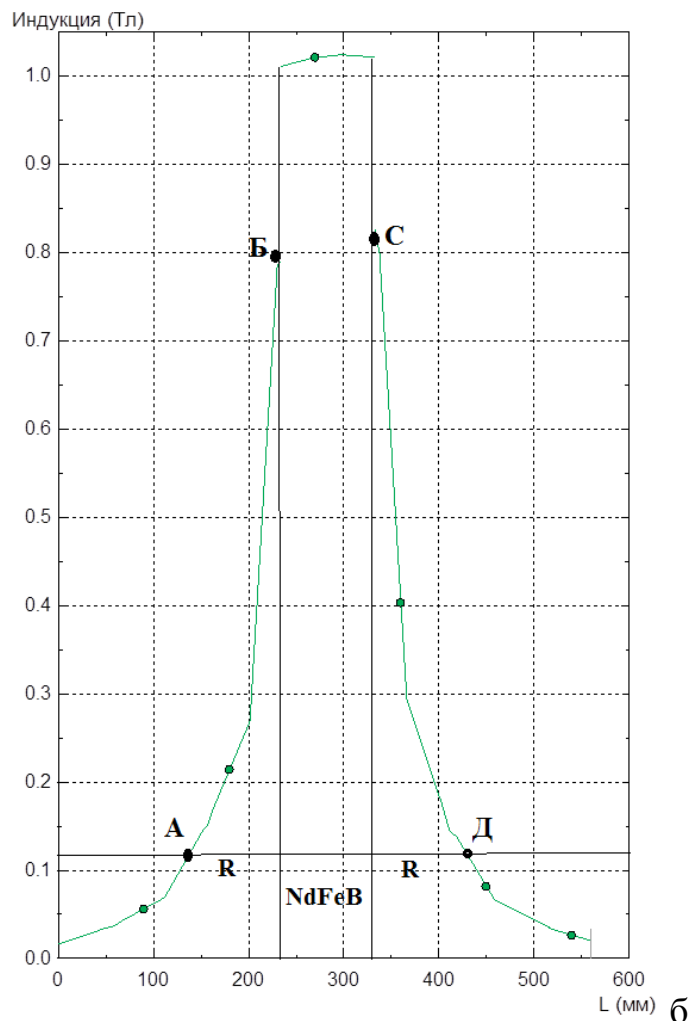
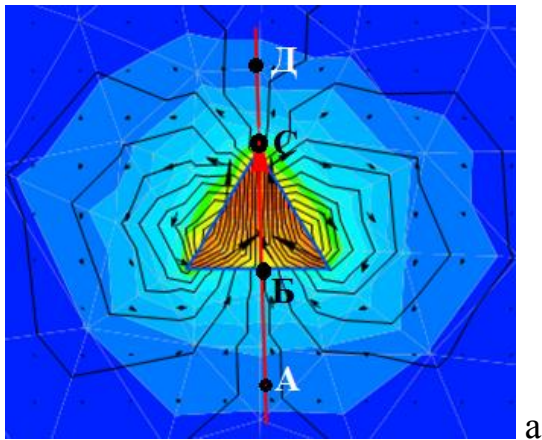
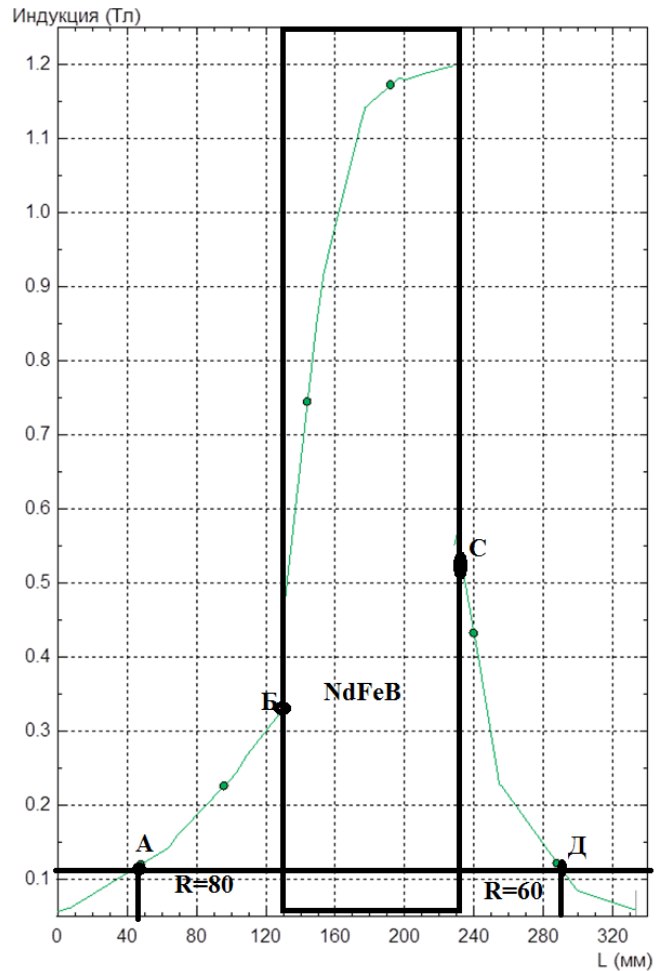


Рисунок 5.2 – Магнитное поле магнитного стержня NdFeB с круглым основанием (диаметр 100 мм), радиус действия магнитов $R = 100$ мм: а – Расчет магнитного поля; б – График индукции магнитного поля вблизи полюсов.

На рисунке 5.3 представлен расчет магнитного поля стержня треугольной формы со стороной 100 мм. Поле выше 0,12 Тл наблюдается на расстоянии 60-80 мм.



а



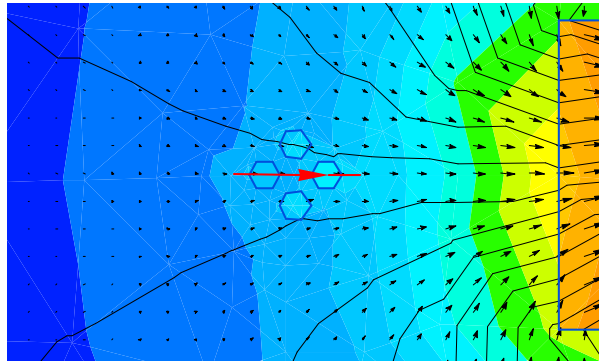
б

Рисунок 5.3 – Магнитное поле магнитного стержня NdFeB с круглым основанием (диаметр 100 мм), радиус действия магнитов $R = 100$ мм: а – Расчет магнитного поля; б – График индукции магнитного поля вблизи полюсов.

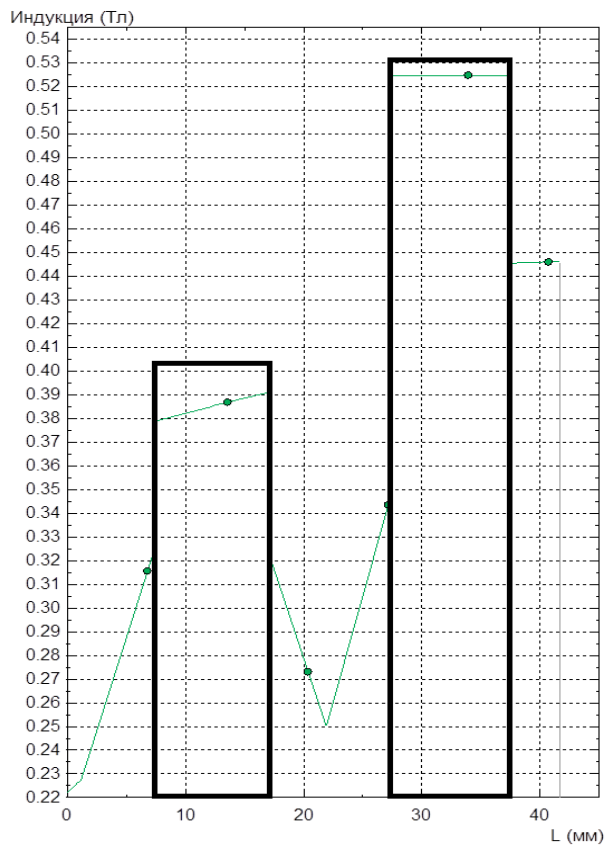
Таким образом, среди рассмотренных вариантов сердечника наиболее предпочтителен стержень квадратной формы.

Среди различных способов расположения стержней в картридже был обоснован тип ромб. На рисунке 5.3 представлен пример расчета индукции и градиента магнитного поля для стальных стержней ферромагнитной картриджа в поле магнита NdFeB. На рисунке 5.4 (б, в) прямоугольниками обозначены стальные стержни и графики изменения индукции. Исходя из расчетов, средний градиент между стержнями при индукции 0,12 Тл составит $12,5$ Тл/м (можно определить путем нахождения угловых коэффициентов прямых на графике). Это

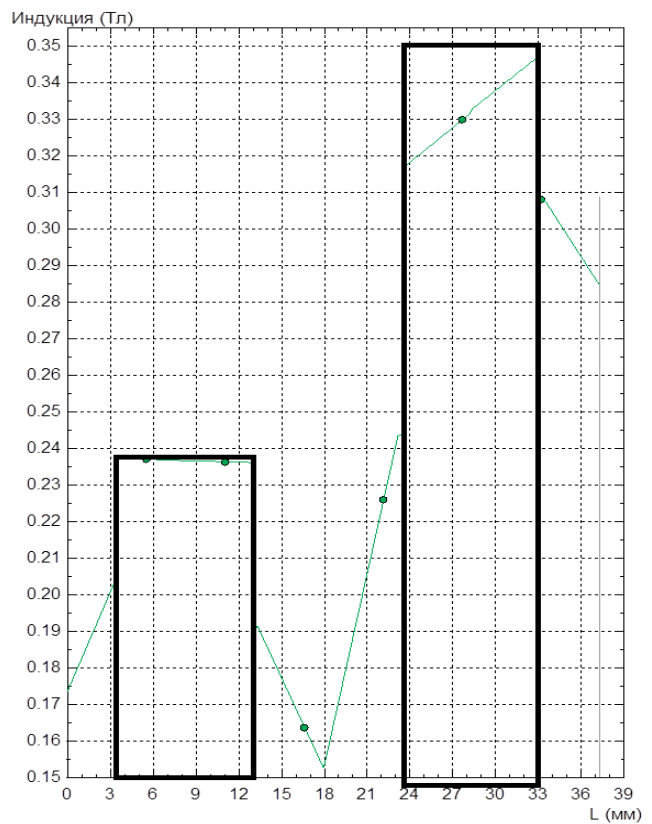
можно считать наименьшим значением градиента в сепараторе, которое возрастает по мере приближения к полюсу магнита.



а



б



в

Рисунок 5.4 – Магнитное поле стальных стержней ферромагнитной упаковки (диаметр 10 мм и расстояние между стержнями 10 мм): а – Расчет магнитной индукции, б – 0,22 Тл; в – 0,12 Тл.

На основе модели (рисунок 5.4) найдем оптимальную толщину ферромагнитных стержней и расстояние между ними в картридже. На рисунке 5.5 представлен расчет магнитной индукции для ферромагнитных стержней различной толщины во внешнем поле 0,12 Тл. Дистанция между соседними

стержнями были выбраны такие же, как и диаметр стержней. На графиках видно, что магнитная индукция в рабочей зоне несколько увеличена до 0,13-0,14 Тл.

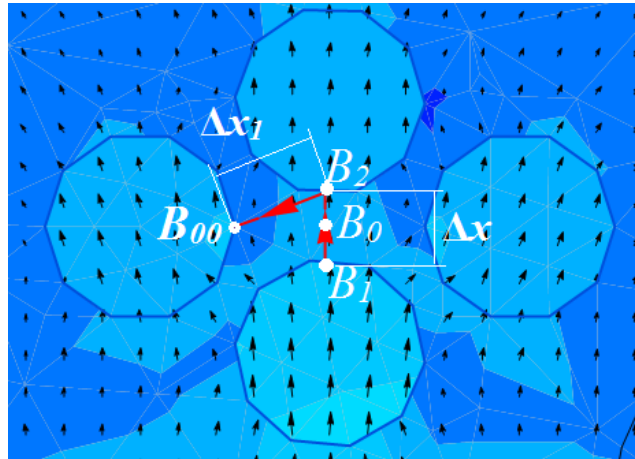


Рисунок 5.5 – Схема оценки градиента магнитного поля в рабочей области картриджа.

На рисунке 5.5 представлена схема оценки среднего линейного градиента магнитного поля в рабочей области. Модуль линейного градиента магнитной индукции между стержнями оценивался по следующей формуле:

$$\left| \frac{dB}{dx} \right| = \left| \frac{B_1 + B_2 - 2B_0}{2\Delta x} \right| + \frac{B_2 - B_{00}}{2\Delta x_1}, \quad (5.1)$$

где B_1 , B_2 , B_{00} – магнитная индукция на поверхности стержней, B_0 – магнитная индукция в центре рабочей зоны, Δx – расстояние между поверхностями верхних и нижних стержней, Δx_1 – расстояние между поверхностями смежных стержней.

На рисунке 5.6 представлен расчет градиента магнитного поля для стержней различной толщины. В таблице 5.1 представлены результаты расчета среднего линейного градиента магнитной индукции по формуле 5.1 для ферромагнитных стержней различной толщины.

Таблица 5.1 – Градиент магнитного поля между стальными стержнями в поле 0,12 Тл.

Толщина стержня (мм) / расстояние между стержнями (мм)	10 / 10	8 / 8	6 / 6	4 / 4	2 / 2	1 / 1
Градиент магнитного поля dB/dx (Тл/м)	12,5	23,7	20	42	76	176

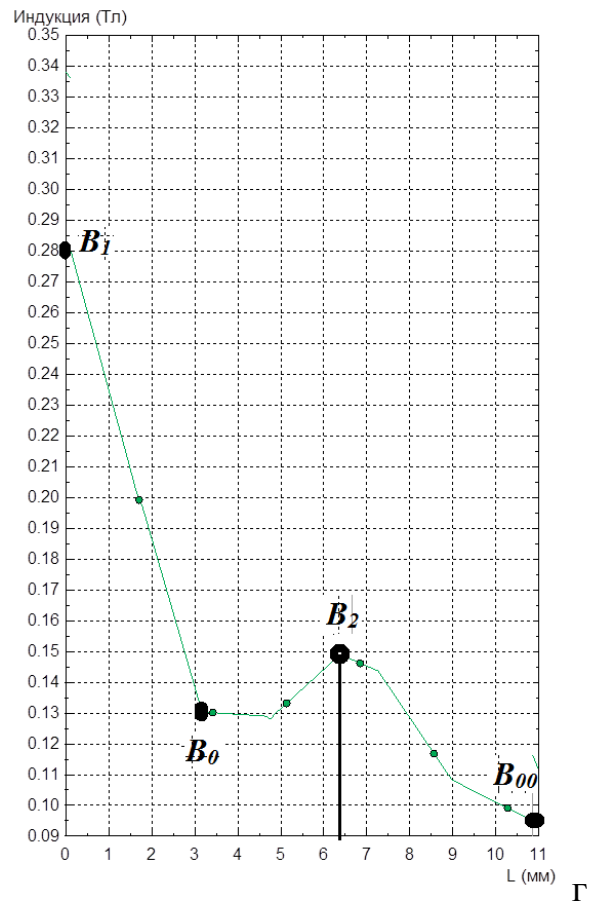
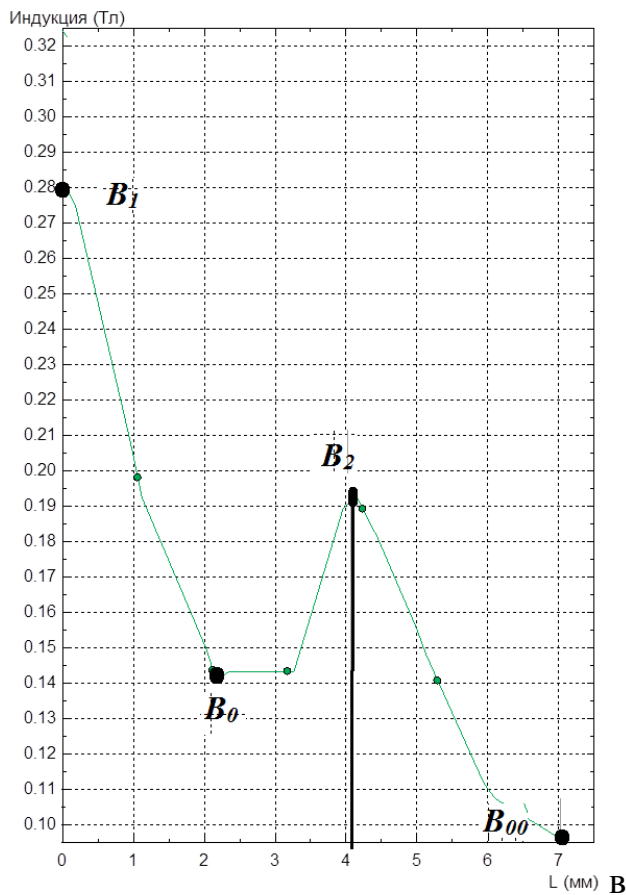
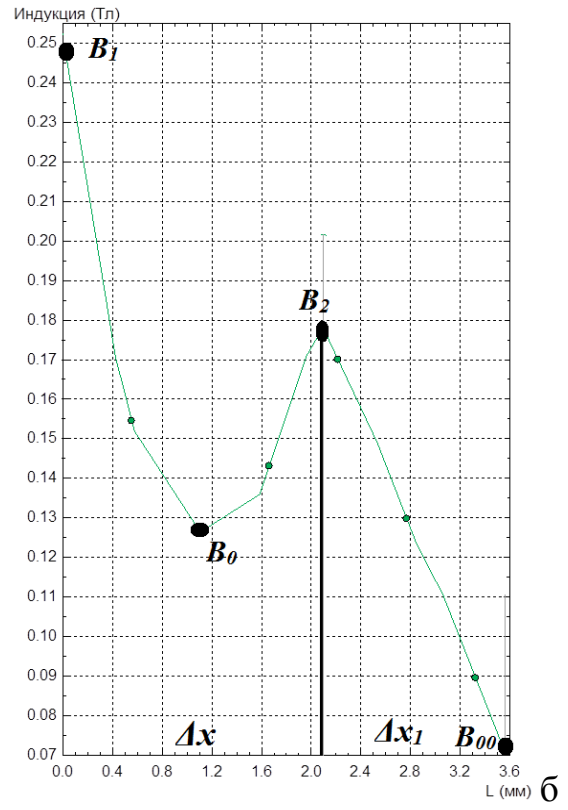
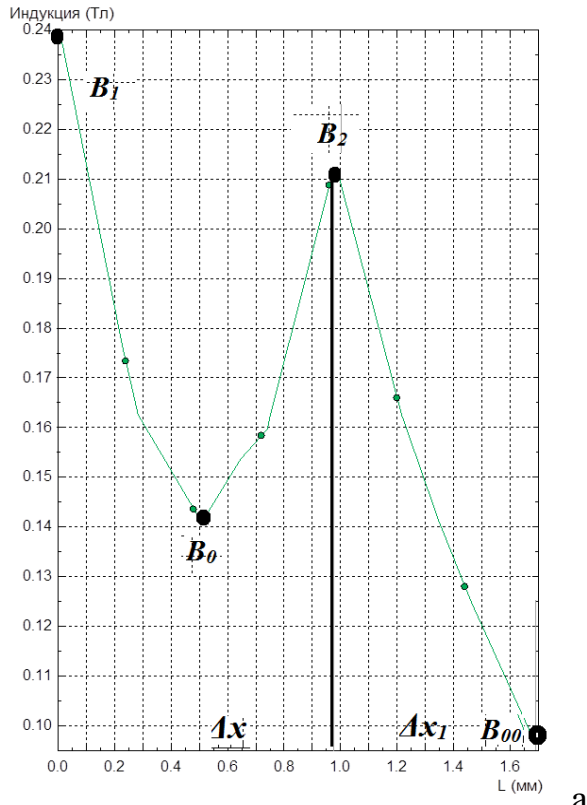


Рисунок 5.6 – Индукция между стальными стержнями ферромагнитного картриджа: а – Диаметр 1 мм, расстояние 1 мм (0,12 Тл), б – Диаметр 2 мм, расстояние 2 мм (0,12 Тл); в – Диаметр 4 мм, расстояние 4 мм (0,12 Тл); г – Диаметр 6 мм, расстояние 6 мм (0,12 Тл)

При одновременном увеличении толщины стержней и пропорционально дистанции между ними значительно падает градиент индукции, а также увеличивается расстояние экстракции. Это мероприятие плохо сказывается на производительность магнитного сепаратора (таблица 5.1). Но с другой стороны, с увеличением толщины стержня увеличивается его магнитный момент, что положительно должно сказываться на градиент магнитного поля при уменьшении расстояния между ними. Но расчеты для стержней толщиной 6 мм, находящихся на расстоянии 1 мм, показали низкий градиент магнитного поля (25 Тл/м) за счет увеличения индукции B_0 (рисунок 5.7).

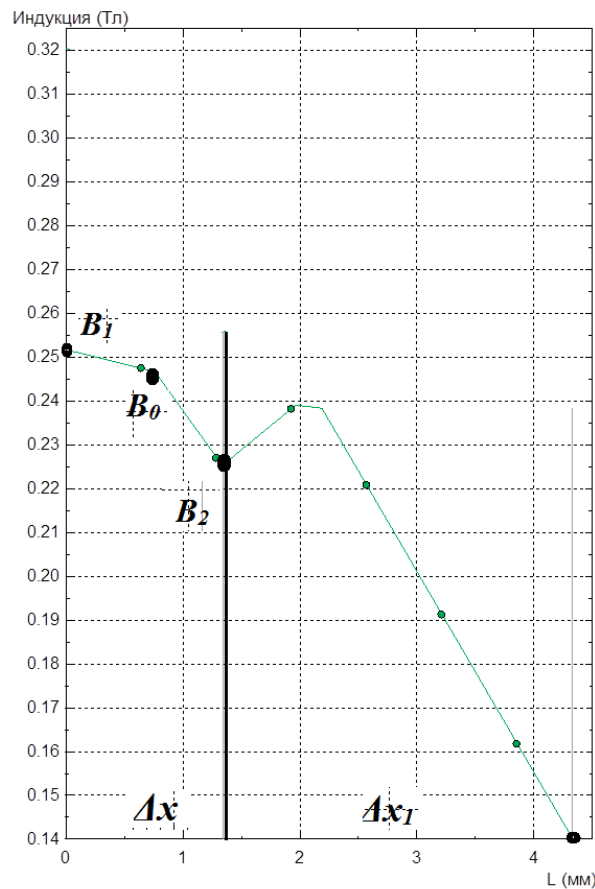


Рисунок 5.7 – Индукция между стальными стержнями ферромагнитного картриджа (диаметр 6 мм, расстояние 1 мм, 0,12 Тл)

Производительность магнитного сепаратора прямо пропорциональна и градиенту магнитного поля dB/dx и коэффициенту рабочей площади φ его поперечного сечения. Произведения этих двух параметров примем, как коэффициент производительности магнитного сепаратора $q = \varphi \cdot dB/dx$. Указанный

коэффициент будем использовать для определения наиболее оптимальной толщины стержней и расстояния между ними.

На рисунке 5.8 представлена схема расчета коэффициента рабочей площади φ в поперечном сечении магнитного сепаратора. Коэффициент рабочей зоны определялся по следующей формуле:

$$\varphi = \frac{S_p - S_{cm}}{S_p}, \quad (5.2)$$

где S_{cm} – площадь стержня в поперечном сечении, S_p – площадь выделенной ромбовидной области.

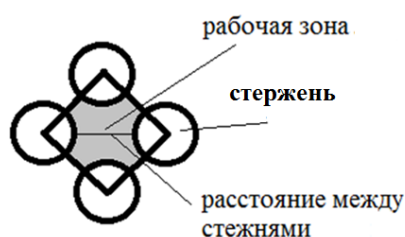


Рисунок 5.8 – Схема расчета коэффициента рабочей площади в поперечном сечении магнитного сепаратора.

В таблицах 5.2 – 5.5 представлена условная оценка коэффициента производительности и служит для определения влияния толщины стержня и расстояния между ними на пропускную способность очищаемой воды через магнитный сепаратор.

Таблица 5.2 – Расчет коэффициента производительности для стержня толщиной 2 мм

Расстояние между стержнями, мм	1	2
Градиент магнитного поля, Тл/м	87	76
Коэффициент рабочей площади	0,47	0,61
Коэффициент производительности магнитного сепаратора	40,9	46,6

Таблица 5.3 – Расчет коэффициента производительности для стержня толщиной 3 мм

Расстояние между стержнями, мм	1	2	3
Градиент магнитного поля, Тл/м	66	53	47
Коэффициент рабочей площади	0,41	0,53	0,61
Коэффициент производительности магнитного сепаратора	27,1	28,1	28,7

Таблица 5.4. Расчет коэффициента производительности для стержня толщиной 4 мм

Расстояние между стержнями, мм	1	2	3	4
Градиент магнитного поля, Тл/м	50	48	45	42
Коэффициент рабочей площади	0,37	0,48	0,55	0,61
Коэффициент производительности магнитного сепаратора	18,5	23	24,75	25,6

Таблица 5.5. Расчет коэффициента производительности для стержня толщиной 6 мм

Расстояние между стержнями, мм	1	2	3	4	6
Градиент магнитного поля, Тл/м	30	26	24	23	20
Коэффициент рабочей площади	0,33	0,41	0,48	0,53	0,61
Коэффициент производительности магнитного сепаратора	9,9	10,7	11,5	12,2	12,2

Исходя из таблиц 5.2 – 5.5, коэффициент производительности растет с уменьшением толщины стержня, при этом наблюдается не только увеличение градиента магнитного сепаратора, но и коэффициента рабочей площади. Для стержней толщиной 1 мм и расстоянием 1 мм коэффициент производительности составил 107.4.

Таким образом, обоснованы следующие положения для магнитного сепаратора с ферромагнитным картриджем:

1. сердечник предлагается изготавливать из редкоземельных магнитов NdFeB с поперечным сечением в форме квадрата;

2. Радиус рабочей зоны поля сердечника от его поверхности (индукция магнитного поля больше 0,12 Тл) не превышает линейный размер сердечника в поперечном сечении;

3. стержни в картридже рекомендуется располагать ромбовидно по отношению к внешнему магнитному полю сердечника (силовые линии по одной вершине заходят и с противоположной вершины ромба выходят);

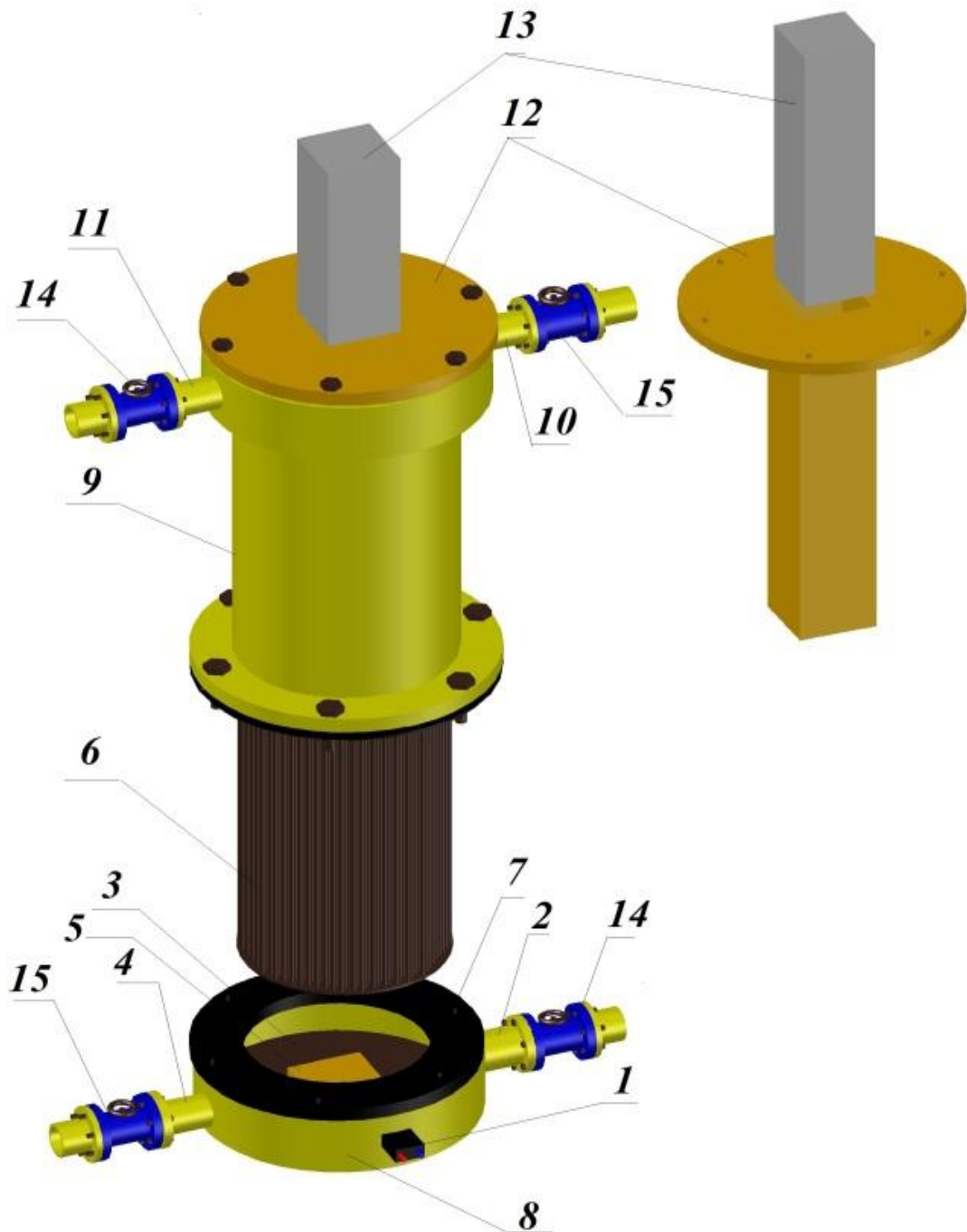
4. стальные стержни в картридже должны иметь диаметр 1 мм, при этом противоположные вершины ромбовидного расположения стержней должны находиться так же на расстоянии равной толщине стержня.

5.2 Высокोगradientный магнитный сепаратор с ферромагнитным картриджем

Конструктивная модель высокोगradientного магнитного сепаратора с ферромагнитным картриджем, предназначенного для очистки пластовой воды от эмульгированных нефтепродуктов в условиях нефтепромысла представлена на рисунке 5.9. На болтах и с прокладочным уплотнением соединены основной корпус 9 и днище корпуса 8. На нижней части корпуса находятся штуцер входа очищаемой воды 4, на котором закреплен клапанов 15, открывающийся во время процесса чистки воды. Так же в нижней части корпуса расположен штуцер входа 2 с клапаном 14, который открывается при промывке рабочей зоны сепаратора горячей водой или смешанно с поверхностно активными веществами. В верхней части основного корпуса находятся штуцер 10 с клапаном 15, который открывается вместе с нижним клапаном при очистке воды и штуцер 11 с клапаном 14, открывающийся при промывке.

Во время режима очистки клапаны 15 вверху и внизу находятся в открытом положении. Поток очищаемой жидкости течет вдоль ферромагнитных стержней. После заполнения устройства магнетитово-нефтяной смесью клапан 15 закрывается и одновременно с ним открываются оба клапана 14. Магнитный сердечник 13 извлекается из верхней части корпуса 12, которая выполняет так же роль «магнитовода». При движении сердечника вверх, магнитное поле волочит за собой омагниченную массу к верхнему патрубку и способствуя процессу промывки. Кроме такой эксплуатационной промывки, предлагается периодически проводить капитальную промывку с применением теплового электронагревателя ТЭН 8. При этом жидкость внутри сепаратора доводится до кипения, что способствует частичному размагничиванию картриджа и удалению

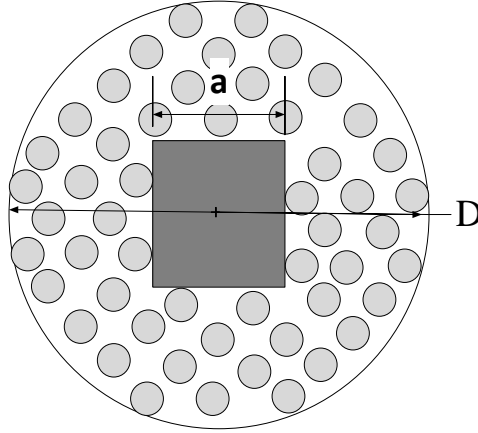
нефтяных отложений. Ферромагнитный картридж 6 устанавливается на направляющую 5. После чего устанавливается крышка 12 на болтах.



1- Штекер подключения ТЭН-а, 2- штуцер промывочного входа, 3 – ТЭН, 4 – штуцер входа очищаемой жидкости, 5 – направляющая картриджа, 6 – ферромагнитный картридж, 7 – герметичный уплотнитель, 8 – днище корпуса, 9 – основной корпус, 10 – штуцер промывочного выхода, 11 – штуцер выхода во время очистки, 12 - верхняя часть разъемного корпуса, 13 – неодимовый магнит, 14 – клапан очистки, 15 – клапан промывки.

Рисунок 5.9 – Магнитный сепаратор с ферромагнитным картриджем

Так как радиус действия магнита равен размеру самого магнита (индукция больше 0,12 Тл), поэтому диаметр ферромагнитного картриджа определяется из соотношения $D=3a$, где a – сторона квадрата в поперечном сечении сердечника NdFeB.



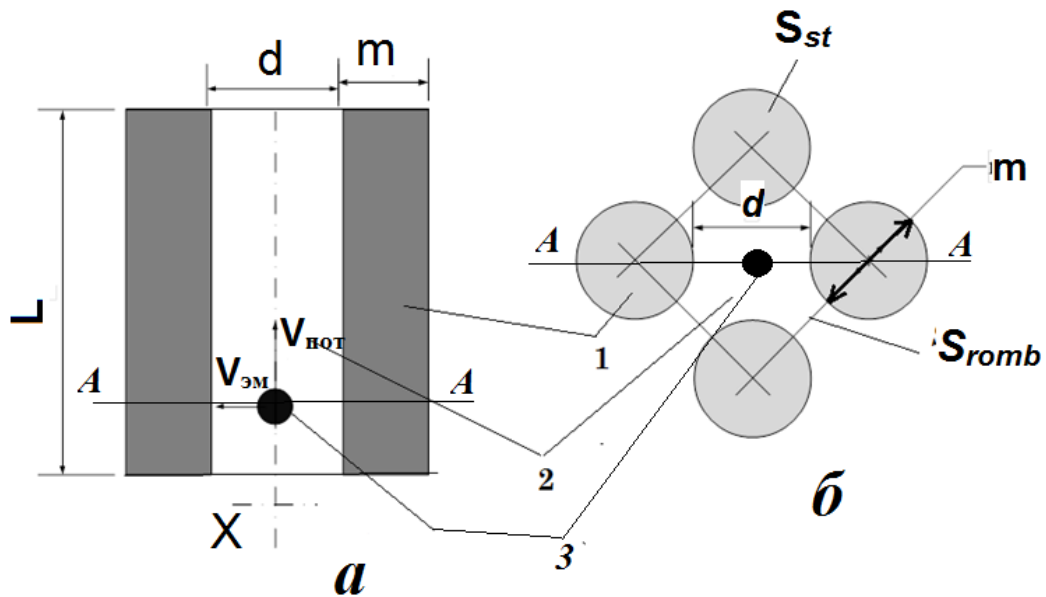
a – сторона квадрата в поперечном сечении сердечника NdFeB, D – диаметр ферромагнитного картриджа

Рисунок 5.10 – Магнитный сепаратор в поперечном разрезе.

Для такого устройства с продольным расположением стержней относительно потока необходимо разработать методику оценки производительности, на основе этого устанавливать режим его работы. Оценку производительности будем выполнять на основе скорости потока очищаемой жидкости в рабочей области устройства, при которой глобула успеет закрепиться на поверхности стержней.

5.3 Методика расчета производительности магнитного сепаратора с продольным расположением стержней относительно потока

Среди различных способов расположения стержней в картридже был ранее обоснован тип ромб. Формализуем модель экстракции глобулы нефти покрытой слоем магнитных наночастиц между к стержням в ферромагнитном картридже. На рисунке 5.11, а и б изображено расположение стержней картриджа в продольном и поперечном сечении соответственно. Стержни продольно расположены относительно потока. Частица движется в потоке между ферромагнитными стержнями толщиной m и длиной L . Расстояние между стержнями d .



1 – ферромагнитные стержни, 2 – рабочая зона между стержнями, 3 – омагниченная капля эмульсии нефти

Рисунок 5.11 – Модель извлечения омагниченной нефтяной капли в магнитном сепараторе с продольным расположением стержней относительно потока: а) модель движения капли в магнитном поле, б) поперечное сечение рабочей зоны магнитного сепаратора

Ранее была выведена формула 3.40 скорости движения омагниченной частицы нефти, в неоднородном магнитном поле. Для устройства магнитного сепаратора управляемыми параметрами являются расстояние извлечения, градиент и индукция поля. Магнитное насыщение для наночастиц магнетита наступает при индукции 0,12 Тл, поэтому большее значение этого параметра не влияет на сильно на скорость. Градиент и расстояние между стержнями являются самыми весомыми параметрами.

Скорость потока жидкости v_{nom} в магнитном сепараторе следует устанавливать из расчета времени, требуемого для захвата глобулы. Время осаждения глобул нефти на стержни картриджа (расстояние экстракции $d/2$) может быть оценено интегральным выражением от функции скорости движения частиц в рабочей зоне:

$$T = \int_0^{d/2} \frac{dX}{v(x)}, \text{ с.} \quad (5.3)$$

По найденному значению T и выбранной длине магнитного стержня L , устанавливаем оптимальную скорость потока воды в рабочей зоне картриджа:

$$v_{opt} \leq \frac{L}{T}, \text{ м/с.} \quad (5.4)$$

Производительность, как известно, это объем очищаемой воды в единицу времени. Таким образом, производительность устройства будет равна произведению скорости потока на рабочую площадь S_r :

$$Q = v_{opt} S_r, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (5.5)$$

Находим рабочую площадь сечения магнитного сепаратора с диаметром корпуса D и магнитным сердечником со стороной a (рисунок 5.10):

$$S_r = \varphi \left(\frac{\pi D^2}{4} - a^2 \right), \text{ м}^2, \quad (5.6)$$

где φ – коэффициент рабочей зоны магнитного картриджа.

Чтобы найти коэффициент φ обратимся к рисунку 5.11(б). В поперечном сечении стержни толщиной m расположены ромбовидно. На рисунке между левым и правым стержнем определим расстояние через величину d , а между верхним и нижним стержнем расстояние m . На предложенной модели каждый следующий стержень будет удален от магнитного сердечника на расстояние d . Коэффициент рабочей зоны отсюда:

$$\varphi = \frac{S_{romb} - S_{st}}{S_{romb}} = \frac{\frac{(m+d) \cdot 2 \cdot m}{2} - \frac{\pi m^2}{4}}{\frac{(m+d) \cdot 2 \cdot m}{2}} = \frac{(m+d) - \pi m / 4}{(m+d)}, \quad (5.7)$$

где S_{romb} – площадь выделенной области, S_{st} – площадь сечения стержня (рисунок 5.11, б).

Таким образом, получаем формулу для расчета производительности магнитного сепаратора :

$$Q = \frac{4S_r L k d_{эм} d_{ч} M_{нас} L(z_{ч})}{9\eta d} \left| \frac{dB}{dx} \right|, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (5.8)$$

Выполнялся поиск геометрически оптимального расположения стержней в картридже, а так же соотношения размеров стержней и расстояний между ними. Выполнено сравнение при разных комбинациях этих показателей. Результаты расчетов представлены в таблице 5.6. Габариты магнитного сепаратора: длина

стержня в картридже $L=0.5$ м, диаметр магнитного сепаратора в поперечном сечении $D=0.3$ м, неодимовый магнит со стороной $a=0,1$ м. Диаметр частиц магнетита $d_{ch} = 10^{-8}$ м, размер капель эмульсии $d_{эм} = 10^{-6}$ м, коэффициент упаковки магнитных наночастиц $k=0.5$.

Таблица 5.6 – Результаты расчета производительности магнитного сепаратора $D=0.3$ м.

Диаметр стержня 10^{-3} , м	Расстояние между стержнями, 10^{-3} , м	Усредненный градиент индукции, Тл/м	Скорость потока в магнитном сепараторе, м/с	Производительность сепаратора Q , $м^3/ч$
1	1	176	0,1	13,9
2	1	87	0,05	5,4
	2	76	0,023	3,00
3	1	66	0,039	3,53
	2	53	0,015	1,82
	3	47	0,009	1,24
4	1	50	0,029	2,42
	2	48	0,014	1,49
	3	45	0,008	1,07
	4	42	0,006	0,83

Анализируя полученные результаты, рекомендуется использовать стержни диаметром не более 1 мм. Увеличить производительность устройства возможно посредством укрупнения его габаритов. Например, при увеличении диаметра магнитного сепаратора в поперечном сечении до $D=0.9$ м и размера неодимового магнита до $a=0,3$ м (для стержней толщиной 1 мм, находящихся на расстоянии 1 мм) производительность увеличивается с 13.9 $м^3/час$ до 74.8 $м^3/час$.

При наличии информации о среднем размере нефтяных частиц и частиц магнетита, можно установить параметры габаритов магнитного сепаратора и режима работы с продольным расположением стержней в картридже относительно потока путем расчетов по алгоритму, приведенному на следующей блок-схеме (Рисунок 5.12). Например, после изучения распределение размеров частиц нефти в пластовой воде и частиц магнетита, можно определить производительность магнитного сепаратора заданных габаритов.

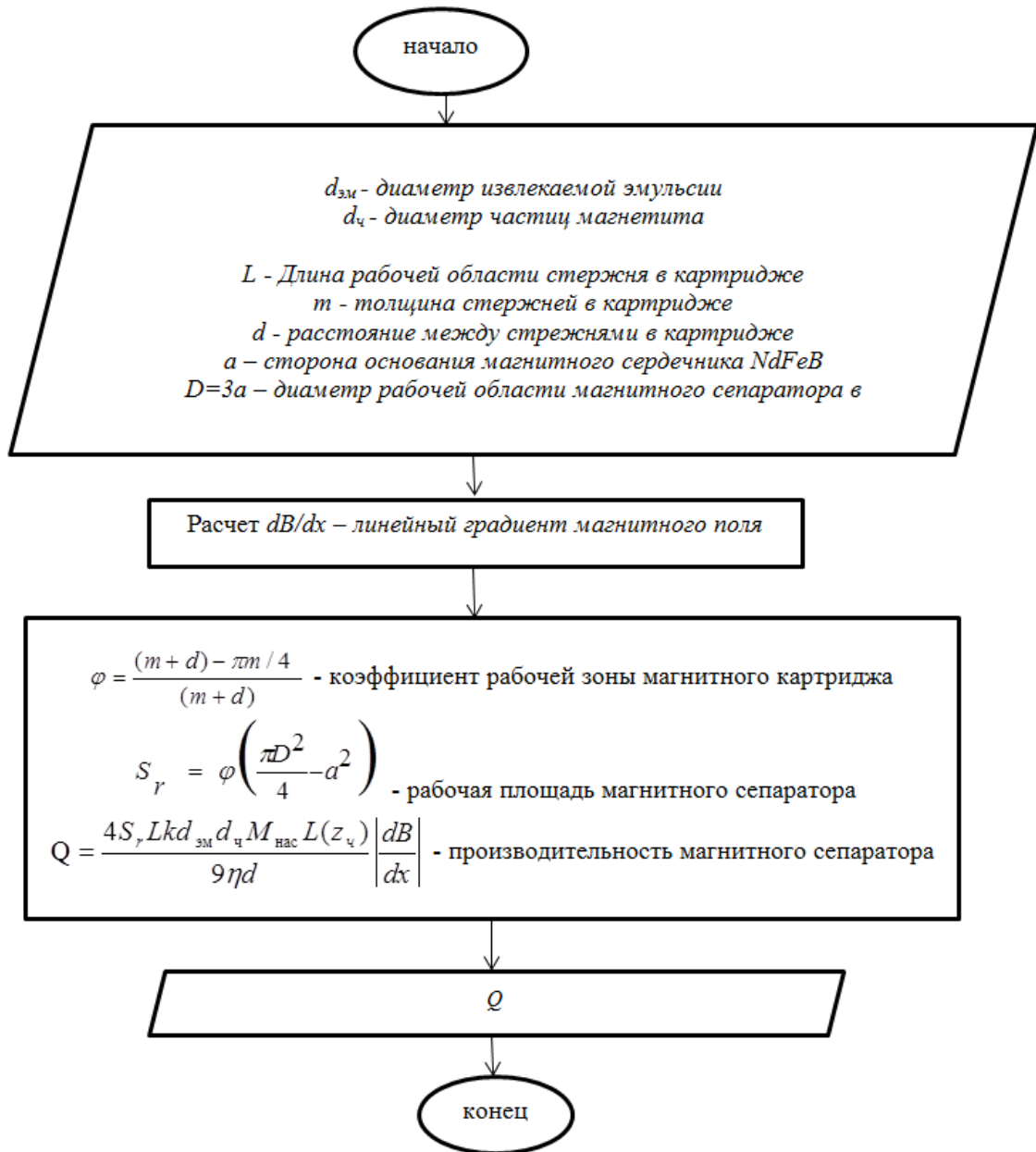


Рисунок 5.12 - Блок-схема алгоритма расчета производительности с продольной стержневой магнитной системой

5.4 Кассетно – патронный высокоградиентный магнитный сепаратор

В конструкции картриджного типа магнитного сепаратора остаточное магнитное поле стержней будет способствовать дополнительному сцеплению во время промывки, что затрудняет процесс промывки рабочей области. С целью устранения этой проблемы в процессе эксплуатации, разработан кассетно – патронный магнитный сепаратор. Рабочий элемент этого устройства изготовлен в виде кассеты, который представляет собой упорядоченный набор из цилиндрических стержней магнитов NdFeB. Были рассмотрены различные

варианты геометрической формы стержней. Некоторые из них представлены на рисунке 5.13. Стержень цилиндрической формы показал наибольшее значение градиента магнитного поля.

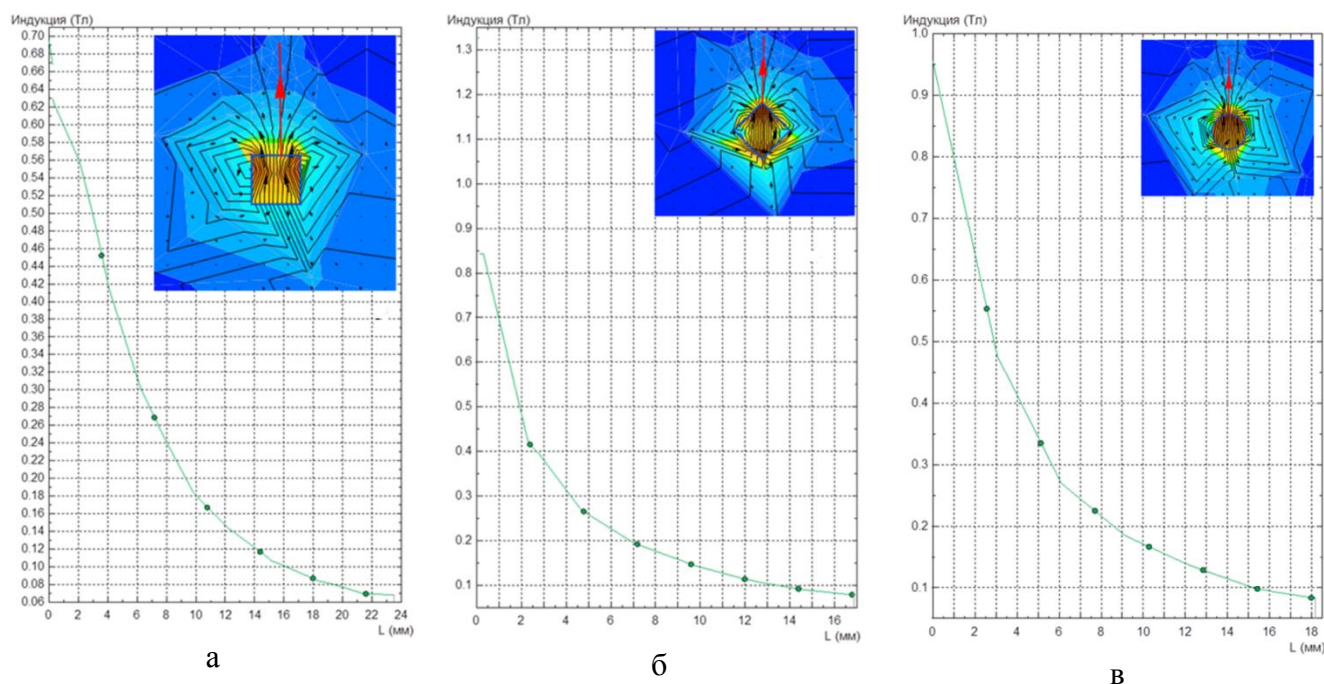


Рисунок 5.13 – Индукция стержней NdFeB в кассете: а – вектор индукции направлен вдоль стороны квадрата (сторона $a=10$ мм), б – вектор индукции направлен вдоль диагонали квадрата (сторона $a=10$ мм), в – для круглого стержня диаметром 11,2 мм.

Кассетно – патронный магнитный сепаратор изображен на рисунке 5.14. Имеет цельную подвижную кассету 1, состоящую из упорядоченного набора цилиндрических стержней NdFeB. Кассета помещается в верхней части пластикового корпуса 2, оснащенного скребковым приспособлением или внутрь кассетного чехла б, изготовленного из силиконового или пластикового материала. На поверхности чехлов собираются и коалесцируют частицы нефти. Корпуса 2 имеет два выходных отверстия: 3 – выход очищенной воды, 4 – выход в режиме промывки рабочей области. Основная часть корпуса 5 изготовлена из прочного пластика, внутри которой находится рабочая область. Нижняя часть корпуса 5 имеет отверстие 7 для ввода очищаемой жидкости и промывки турбулентным потоком.

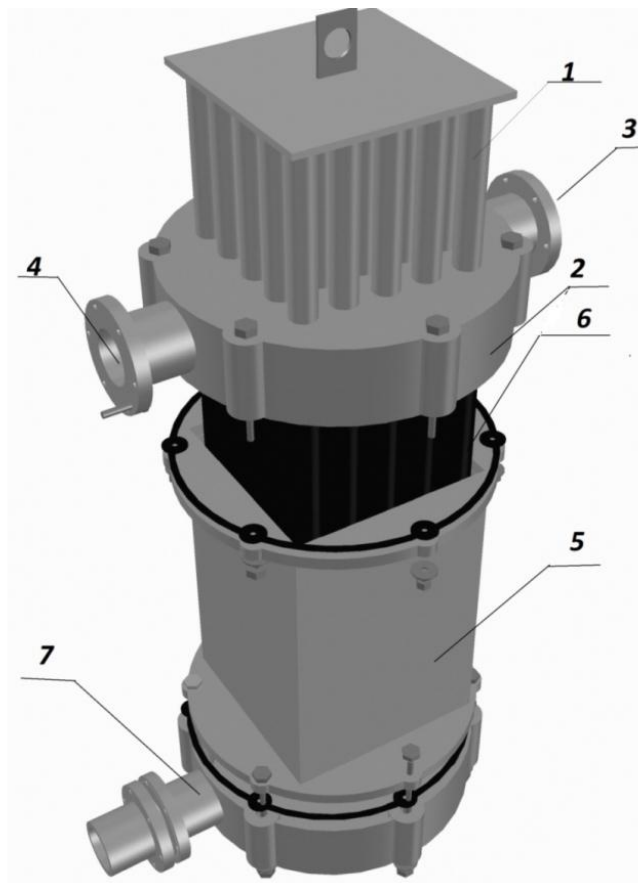
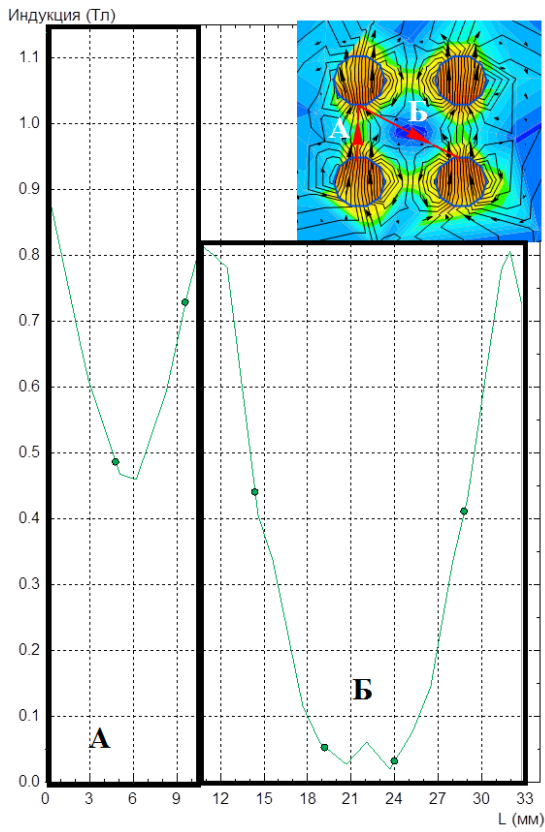
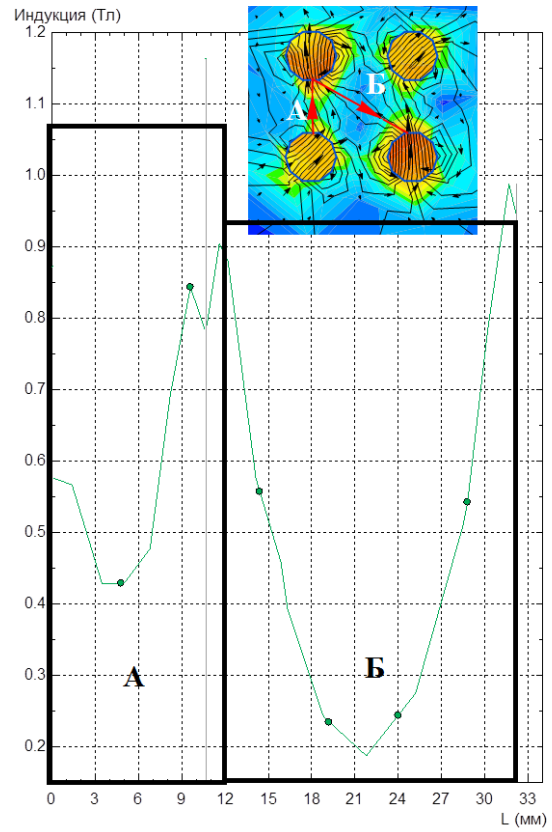


Рисунок 5.14 – Кассетно – патронный магнитный сепаратор

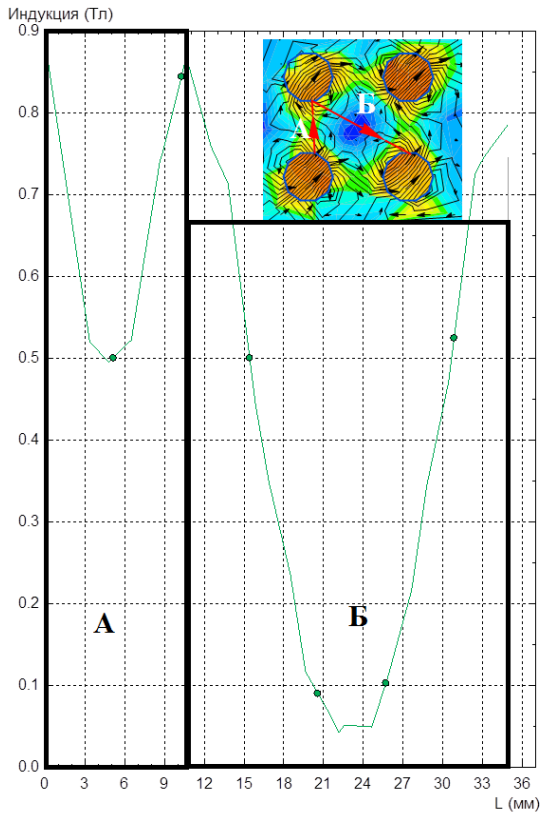
Были рассмотрены различные варианты расположения цилиндрических стержней в кассете (рисунок 5.15). На рисунках по линии *A* выполнен расчет магнитного поля между верхним и нижним стержнем в поперечном сечении, составляющим соседние вершины квадрата. По линии *B* выполнен расчет магнитного поля диагонали квадрата основной рабочей зоны. Ранее был сделан вывод о том, что радиус действия магнитов равен линейному размеру самого магнита в поперечном сечении, поэтому при составлении модели диаметр стержня и расстояние между соседними стержнями были выбраны одинаковыми. В первичных расчетах эта величина была принята равной 10 мм. Расчеты проводились при изменении направления полюсов магнитов. Результаты расчетов представлены на рисунке 5.15.



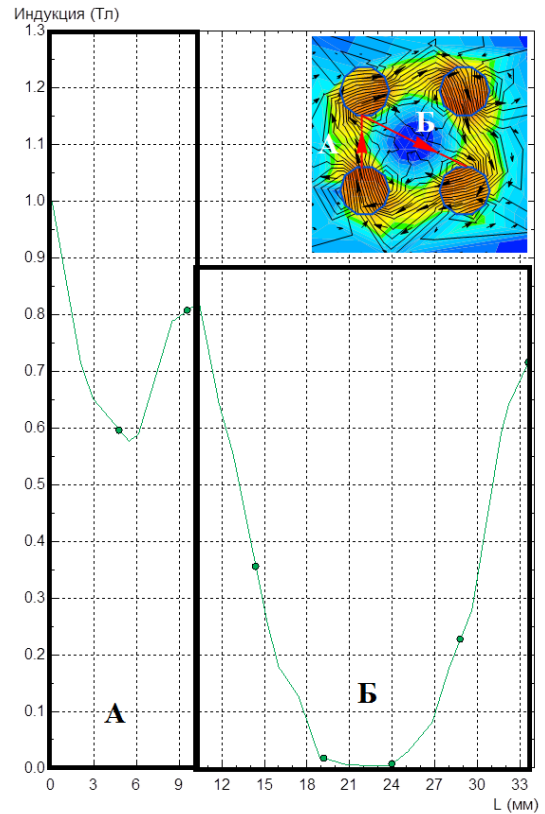
а



б



в

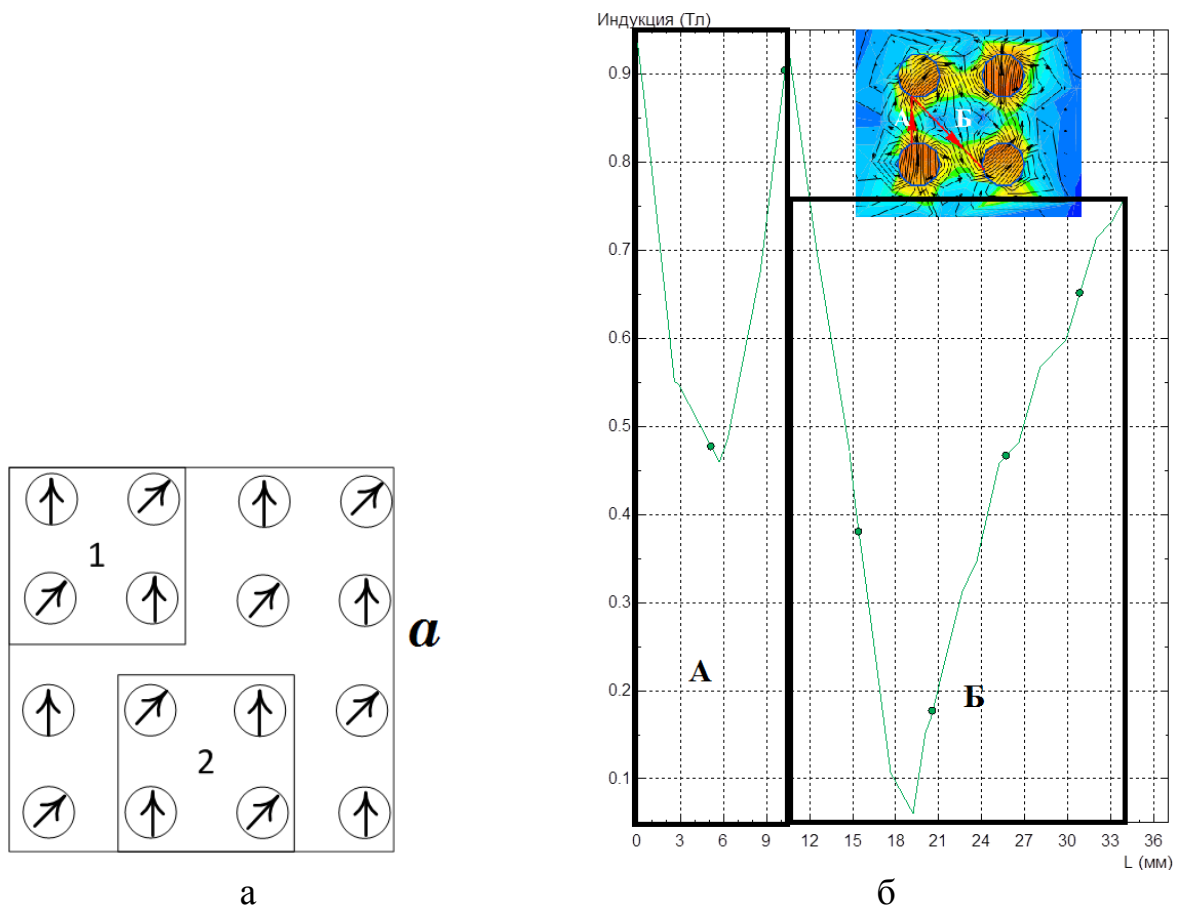


г

Рисунок 5.15 – Результаты расчета магнитного поля в рабочей области стержней в кассете диаметром 10 мм с учетом направления вектора индукции соседних стержней: а – $\vec{B} \ 90^0 - 90^0$; б – $\vec{B} \ 90^0 - 45^0$; в – $\vec{B} \ 45^0 - 45^0$; г – \vec{B} круговое

Градиенты во всех вариантах расположения стержней были с небольшой разницей равными. При расположении соседних стержней $90^0 - 45^0$ рисунке 5.15, б наблюдается магнитное поле «без дырок» (больше 0,12 Тл), поэтому выбираем такое расположение стержней в кассете. В остальных случаях обнаруживаются области с индукцией меньше 0,12 Тл, поэтому магнетит не будет магнитно насыщаться в такой зоне, а, следовательно, критерий скорости не будет максимизирован по параметру магнитный момент.

На рисунке 5.16, а изображена схема направления полюсов магнитов в разрезе рабочей области кассеты 1 (рисунок 5.14). С учетом выбора расположения стержней (изображенного на рисунке 5.15, б) в кассете можно маркировать два типовых сектора. Моделирование поля в рабочей зоне второго сектора изображено на рисунке 5.16, б.



1 – сектор 1; 2 – сектор 2; \uparrow - вектор магнитной индукции

Рисунок 5.16 – Результаты расчета магнитного поля поперечного сечения магнитных стержней: а – схема расположения стержней в кассете; б – расчет магнитного поля для сектора 2

Для оценки производительности магнитного сепаратора с кассетой используем формулу 5.8. Рабочая зона сепаратора в квадратном сечении со стороной a определяется соотношением:

$$S_r = \varphi \cdot a^2, \text{ м}^2. \quad (5.9)$$

Результаты расчета производительности кассетно – патронного магнитного сепаратора при условии $a = 0,5, \text{ м}; L=0,5\text{м}; d_{\text{ч}} = 10^{-8} \text{ нм}, d_{\text{эм}} = 10^{-6} \text{ м}$ представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Расчет производительности кассетного магнитного сепаратора :
 $L=0,5\text{м}; d_{\text{ч}}=10^{-8}\text{нм}; d_{\text{эм}}=10^{-6}\text{м}.$

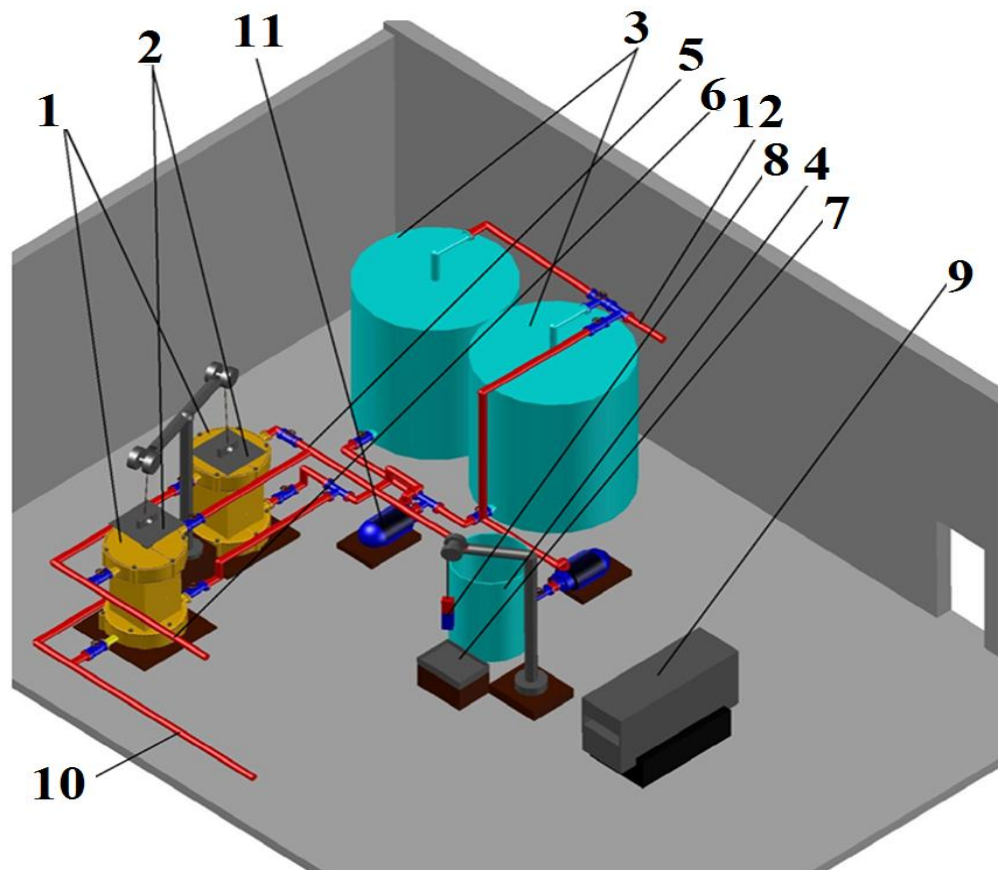
Толщина стержня NdFeB, $\text{м} \cdot 10^{-3}$, м	Расстояние между стержнями, $d \cdot 10^{-3}$, м	Усредненный градиент магнитного поля (Тл/м)	Скорость потока в магнитном сепараторе, v , (м/с)	Производительность сепаратора, Q , ($\text{м}^3/\text{ч}$)
1	1	580	0,35	47,3
3	3	580	0,11	15,8
5	5	560	0,062	9,59
10	10	240	0,014	2,21
	20	80	0,002	0,45
20	10	264	0,015	1,91
	20	130	0,004	0,59
	40	50	0,001	0,14

Таким образом, при дальнейшем уменьшении толщины стержня существенного увеличения градиента не наблюдалось, но производительность увеличивается за счет рабочей площади. Таким образом, кассетный МС имеет больший эффект с точки зрения производительности по сравнению с магнитным сепаратором картриджного типа. Укрупнение габаритов так же способствует увеличению производительности. При укрупнении габарита a от $a=0,5 \text{ м}$ до $a=1 \text{ м}$ кратность увеличения производительности 3,5-3,8 раз.

5.5 Принципиальная конструкция установки для очистки

На рисунке 5.17 представлена технологическая схема очистки пластовой воды. Следом за отстаиванием в резервуарах-отстойниках типа РВС-5000 или РВС-10000 пластовая вода поступает по линии 12 в резервуар 3, где

перемешивается с нанодисперсным магнетитом. На следующем этапе, полученная смесь пластовой воды и наночастиц магнетита прокачивается насосом 11 через магнитный сепаратор 1 и далее по трубам 6 направляется в систему поддержания пластового давления. В процессе очистки происходит заполнение сепаратора 1. В режиме промывки извлекается кассета или сердечник 2 из рабочей области подъемным механизмом. Магнитный сепаратор очищается от магнетитово-нефтяной смеси средствами ПАВ, поступающими по линии 10. Вся смесь поступает в емкость 4 по линии 5, где с помощью магнитов 8 экстрагируются в лоток 7. Далее из лотка его направляют в блок восстановления магнитных частиц. Остатки воды из резервуара 4 прокачиваются в резервуар 3.



1 – магнитный сепаратор ; 2 – кассета или сердечник; 3 – резервуар; 4 – резервуар магнетитово-нефтяной смеси после промывки; 5 – линия промывки; 6 – линия очищенной жидкости; 7 – лоток для сушки и обжига магнетита; 8 – магнит; 9 – печь; 10 – линия поступления промывочной жидкости; 11 – насос; 12 – линия поступления воды из РВС

Рисунок 5.17 – Технологическая схема работы установки

В блоке ВМЧ полноценный процесс восстановления частиц состоит из следующих этапов:

1. Выжигание магнетитово-нефтяной смеси при температуре 700°C . В процессе термической обработки магнетит превращается в оксид железа (III). Далее, полученный объемный конгломерат, истирается в мельнице. При таком механическом измельчении, получение частиц размерами порядка 1 мкм не является трудной задачей. Измельченный порошок направляется в магнитный сепаратор, где сухой магнетитовый порошок отделяется от продуктов горения. Дальше, для повторного использования магнетита, разработан способ химической регенерации путем повторной конденсации магнетита.

2. Выжигание нефтепродуктов при температуре 800°C . В процессе термической обработки магнетит превращается в трехвалентный оксид железа.

3. Образование трехвалентного хлорида железа путем растворения соляной кислоты.

4. По известной методике Массарта магнетита конденсируем раствором аммиака с добавлением соли двухвалентного железа.

Принципиальная схема методики регенерации нанодисперсных частиц магнетита представлена следующим образом (рисунок 5.18).

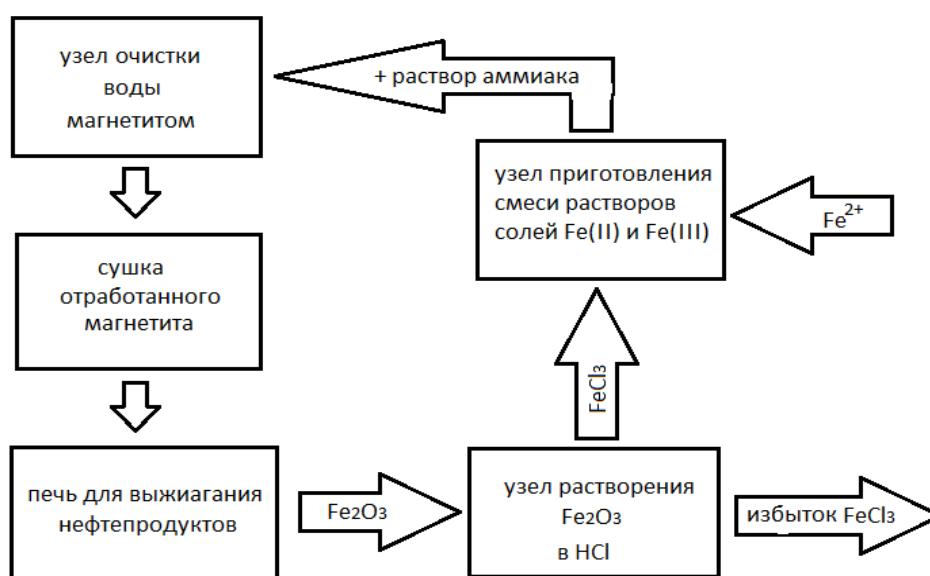


Рисунок 5.18 – Технологическая схема цикла регенерации наночастиц магнетита.

В соответствии с этой схемой метод позволяет обеспечить замкнутый технологический цикл, завершающийся получением свежеприготовленного магнетита, максимально эффективного реактива для последующей очистки воды.

Отметим, что в разработанной методике восстановления, образуется избыточное количество хлорида железа (III). Для этого требуется дополнительно восстановление железа для получения соли двухвалентного Fe. Таким образом, дополнительный блок восстановления двухвалентного железа с одной стороны, убирает вопрос утилизации избытка трехвалентного хлорида железа, с другой стороны, отпадает необходимость в двухвалентном железе, а блок восстановления магнитных наночастиц будет полностью замкнутым.

Выводы по главе

1. Предложена методика выбора оптимальных параметров высокоградиентного магнитного сепаратора (ВМС) определяющих геометрию расположения стержней и режим работы устройства.

2. Разработана конструкция ВМС с ферромагнитным картриджом, отличающийся тем, что стержни толщиной 1 мм и расположены на расстоянии 1 мм друг от друга. При этом геометрия стержневой системы имеет ромбовидное расположение стержней по отношению к магнитному полю сердечника. Увеличение толщины стержней приводит к снижению градиента магнитного поля, что в свою очередь влечет к снижению производительности.

3. Разработана конструкция ВМС кассетного типа, отличающийся тем, что для кассеты устройства оптимальным расположением стержней NdFeB является 90° и 45° диагональных вершин при квадратном расположении с толщиной и расстоянием не более 5 мм.

4. Предложена принципиальная схема компоновки промышленной установки для очистки эмульгированных пластовых вод на основе разработанной конструкции ВМС с ферромагнитными и магнитными стержнями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполненный анализ показал, что магнитные наночастицы магнетита обладают повышенной сорбирующей активностью в пограничном слое нефти и воды, и это может быть применено для понижения остаточного содержания нефтепродуктов в воде, что является актуальным при подготовке пластовых вод к заводнению, при этом, изученный механизм существующих жидкостных магнитных сепараторов, показал практическую потребность в разработке устройства способного решать задачу по экстракции из пластовых вод омагниченной нанодисперсным магнетитом глобулы нефти.

2. Разработан метод определения оптимальной концентрации нанодисперсного магнетита при очистке пластовой воды, основанный на сведениях о размерах частиц магнетита, о составе пластовой воды и первичных испытаниях, при этом концентрация магнетита может варьировать от 20 до 500 мг/л.

3. Разработана и обоснована методология проектирования магнитного сепаратора с продольным расположением стержней относительно потока, при этом для сепаратора с ферромагнитным картриджем стержни рекомендуются выбирать диаметром не более 1 мм и располагать ромбовидно по отношению к внешнему магнитному полю сердечника, а для сепаратора кассетно - патронного типа оптимальным расположением полюсов стержней NdFeB является 90° и 45° диагональных вершин при квадратном расположении с диаметром стержня и расстоянием между ними не более 5 мм.

4. Предложена методика оценки производительности магнитного сепаратора с продольной относительно потока стержневой системой, позволяющая устанавливать режим работы магнитного сепаратора, при этом для сепаратора картриджного типа с заданными параметрами (стержня 1 мм, длиной картриджа 0,5 м и с диаметром рабочей области 0,3 м) производительность составила 14 куб. м в час, при этих же габаритах для кассетно-патронного сепаратора производительность составила 47.9 куб. м в час.

5. Предложена принципиальная конструкция промышленной установки для очистки пластовых вод от нефтезагрязнений с концентрацией 50 - 100 мг/л до нормативных концентраций в пределах 3-7 мг/л с доверительной вероятностью 0,95.

Литература:

1. Автор. свид. 457666 СССР: МКИ СОIG 49/08. Способ получения феррожидкости / Бибик Е. Е., Лавров И. С. – № 1801123, 23-26, заявл. 22.06.1972, опубл. 25.01.1975, Бюл. № 3. 1974.
2. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 278 с.
3. Анапольский, В. Н. Очистка нефтесодержащих сточных вод: Электр. журнал С.О,К. (Сантехника. Отопление. Канализация) / В. Н. Анапольский; науч. конс-ты.: С. В. Олиферук, А. П. Романенко. – 2011. – № 1.– URL: <http://www.c-o-k.ru/articles /ochistka-neftesoderzhaschih-stochnyh-vod>
4. Артемов, А. В. Сорбционные технологии очистки воды от нефтяных загрязнений: Вода: химия и экология / А. В. Артемов, А. В. Пинкин. – 2008. – №1. – с. 19 - 25. – URL: <http://cdn.scipeople.com/materials/3920>.
5. Афремов, Л. Л. Магнитные состояния и гистерезисные характеристики малых частиц магнетита / Л. Л. Афремов, А. В. Панов // Физика металлов и металловедение. – 1998. – Т. 86, вып. 3. – С. 65 – 73.
6. Байбуртский, Ф.С. Магнитные жидкости: способы получения и области применения / Ф. С. Байбуртский // Химия и химики. – 2002. – № 3. – 24 с.
7. Баткин, И. С. Теоретический анализ процесса воздействия суперпарамагнитных частиц на промышленные эмульсии / И. С. Баткин, Ю. Г. Смирнов // Системы управления и информационные технологии, 2012. – №2.2(48). – С. 233-236.
8. Бибик, Е. Е. Поведение золь и суспензий в магнитном поле / Е. Е. Бибик, И. Ф. Ефремов, И. С. Лавров // Сб. докладов «Исследования в области поверхностных сил». – М.: Наука, 1964. – С. 265-272.
9. Богомолов, В. Н. Устройство с датчиками Холла и датчиками магнитосопротивления / В. Н. Богомолов. – М. -Л.: Госэнергоиздат, 1961.– 167 с.

10. Булыжев, Е. М. Математическая модель процесса очистки в патронном магнитном сепараторе / Е. М. Булыжев, Н. Н. Кондратьева // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – № 10. Приложение. – С. 14 - 18.
11. Булыжев, Е. М. Моделирование, расчет и проектирование кассетных патронных магнитных сепараторов для очистки больших объемов водных технологических жидкостей / Е. М. Булыжев, Е. Н. Меньшов, Н. Н. Кондратьева, А. Ю. Богданов, Э. Е. Булыжев; под общей редакцией Е. М. Булыжева . – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 216 с.
12. Булыжев, Е. М. Наследственность дисперсных составов механических примесей при очистке СОЖ в тонкослойных гравитационных очистителях / Е. М. Булыжев, А. Ю. Богданов, М. Е. Краснова, В. В. Сошников // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – № 12. – С. 39–43.
13. Булыжев, Е. М. Новое поколение гравитационных очистителей водных технологических жидкостей / Е. М. Булыжев М. Е. Краснова А. Ю. Богданов; под общ. ред. Л. В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 192 с.
14. Булыжев, Е. М. Ресурсосберегающее применение смазочно-охлаждающих жидкостей при металлообработке / Е. М. Булыжев, Л. В. Худобин. – М.: Машиностроение, 2004. – 352 с.
15. Гаврилова, Н. Н. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов: учеб.пособие / Н. Н. Гаврилова, В. В. Назаров, О. В. Яровая. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. – 52 с.
16. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. Пособие. – М.: ИД Юрайт, 2010. – 479с.
17. ГОСТ 31953-2012 Вода. Определение нефтепродуктов методом газовой хроматографии М.: Стандартиформ, 2013. – 23 с.
18. Градус, Л. Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии / Л. Я. Градус. – М.: Химия, 1979. – 232 с.
19. Гумеров, М. Г. Борьба с потерями нефти и нефтепродуктов на нефтеперерабатывающих предприятиях / М. Г. Гумеров ; Центр. науч.-исслед. ин-

т информ. и техн.-экон. исслед. нефтеперераб. и нефтехим. пром-сти. – М.: ЦНИИТЭ - нефтехим, 1976. – 67 с. – 1976

20. Дикий, Н. П. Структура и магнитные свойства гамма - активированных наночастиц магнетита / Н. П. Дикий, Е. П. Медведева, И. Д. Федорец, Н. П. Хлапова, Н. С. Луцай // Вестник харьковского университета . – 2009. – № 859. – С. 89 - 94.

21. Дубицкий, С. Д. ELCUT — инженерная система моделирования двумерных физических полей / С. Д. Дубицкий, В. П. Поднос // CADmaster. – 2001.– №1.– С.17-21.

22. Елисеев, А. А. Физические свойства веществ в нанокристаллическом состоянии / А. А. Елисеев, А. В. Лукашин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 61 с.

23. Иванов, В. М. Математическая статистика / В. М. Иванов, В. Н. Калинина, Л. А. Нешумова, И. О. Решетникова // Учебник для техникумов. – М.: «Высшая школа», 1975. – 398 с.

24. Измерение массовой концентрации химических веществ люминесцентными методами в объектах окружающей среды: Сборник методических указаний.— М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003.— 272 с.

25. Кацев, П. Г. Статистические методы исследования режущего инструмента / П. Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1974. – 231 с.

26. Кацман, М. М. Расчет и проектирование электрических машин: Учеб. пособие для техникумов / М. М. Кацман. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с.

27. Классен, В. И. Введение в теорию флотации / В. И. Классен, В. А. Мокроусов. – М.: Госгортехиздат, 1959. – 636 с.

28. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816с.

29. Колмогоров, А. Н. О логарифмически нормальном распределении размеров частиц при дроблении / А. Н. Колмогоров // Доклады АН СССР. – 1941. – Т.31, №2. – С. 145-148.

30. Кондорский, Е. И. Природа высокой коэрцитивной силы мелкодисперсных ферромагнетиков и теория однодоменной структуры/ Кондорский Е. И. // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1952. – Т.16, №4. – С.398 - 411.

31. Коньгин, С. Б. Процессы седиментации в дисперсных системах. Методические указания к самостоятельной работе / С. Б. Коньгин, С. В. Иваняков. – Самара: СГТУ, 2009. – 21 с.

32. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – Л.: Химия, 1987. – 264 с.

33. Краснов, И. П. Основы классической теории намагничения тел: учебное пособие / И. П. Краснов. – СПб: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2007. – 213 с.

34. Краснова, М. Е. Разработка и исследование технологической эффективности тонкослойных гравитационных очистителей водных СОЖ на шлифовальных операциях Дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Краснова Марина Евгеньевна. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 195 с.

35. Кузнецов, О. Л. Термодинамика процессов загрязнения экологически чистых систем / О. Л. Кузнецов, Э. М. Симкин // Техноэкогеофизиконовые технологии извлечения минерально-сырьевых ресурсов в XXI веке. – Ухта: УГТУ, 2002. – С.89-94.

36. Ланина, Т. Д. Процессы переработки пластовых вод месторождений: монография / Т. Д. Ланина, В. И. Литвиненко, Б. Г. Варфоломеев. – Ухта: УГТУ, 2006. – 172 с.

Литература:

37. Лютоев, А. А. Агрегативная устойчивость одночастичной модели магнитного коллоида / А. А. Лютоев // Сборник научных трудов: материалы II Всероссийской научной конференции «Молодежь и наука на Севере». – Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2013. – Т.2– С.109-110.

38. Лютоев, А. А. Извлечение эмульгированных примесей нефти из воды при помощи высокодисперсных частиц магнетита / А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов,

И. В. Ивенина // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – М.: ВНИИОЭНГ, 2014, №4. – С. 40–45

39. Лютоев, А. А. Математическая модель седиментационной устойчивости магнитных частиц оксидов железа в жидкой среде / А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов // Физико-математическое моделирование систем: IX Международный семинар. В 3 ч. ; ч. 3. – Воронеж. – 2012. – С. 7-10.

40. Лютоев, А. А. Численное моделирование процесса омагничивания нефтяных эмульсий с использованием наночастиц магнетита для управления системой очистки воды от нефтепродуктов / А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов // Естественные и технические науки. М.: Спутник+, 2013. – №2. – С. 334-342.

41. Магнитные системы и устройства / Научно производственное объединение «ЭРГА» . – URL: <http://mg.erga.ru/upload/uf/69c>

42. Милославский, В. Ю. Домашняя микрофотография / В. Ю. Милославский // Наука и жизнь. – 1998. – №1. С. 65–69.

43. Минаков, В. В. Новые технологии очистки от нефтяных загрязнений /С. М. Кривенко, Т. О. Никитина // Экология и промышленность России. – 2002. - С.7 - 9.

44. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. ELCUT. Версия 5.1.: Руководство пользователя. – СПб.: Производственный кооператив ТОР, 2003.– 249 с.

45. Назаров, В. В. Практикум и задачник по коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: учеб. пособие для вузов / В. В. Назаров, А. С. Гродский, А. Ф. Моргунов, Н. А. Шабанова, А. Ф. Кривощепов, А. Ю. Колосов; под ред. В. В. Назарова, А. С. Гродского. – М.: ИКЦ Академкнига, 2007. – 374 с.

46. Науменко, В. Ю. Определение магнитных свойств наночастиц оксида железа и их использование при магнитно-резонансной томографии / В. Ю. Науменко, Н. Л. Шимановский, А. Г. Акопджанов, И. В. Воронин // Научная сессия МИФИ - 2010. Сборник научных трудов. – 2010. – Т.2 – С.141-141.

47. Небогина, Н. А. Процесс стабилизации и осадкообразования водно-нефтяных систем / Н. А. Небогина, И. В. Прозорова, Н. В. Юдина // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2007. – №2. – С. 1-7. – URL: http://www.ogbus.ru/authors/Nebogina/Nebogina_2.pdf.

48. Нуштаева, А. В. Пены и эмульсии, стабилизированные твердыми частицами: механизмы стабилизации / А. В. Нуштаева, Н. Г. Вилкова // Вестник башкирского университета. Уфа: Башкирский государственный университет, 2017. – 74 - 85

49. Нуштаева, А. В. Эмульсии, стабилизированные твердыми частицами: Монография. – М.: Инфра-М, 2014. – 158 с.

50. Падалка, В. В. Взаимодействие коллоидных магнитных частиц с электрическим и магнитным полями коллоидах: диссертация д-ра физ.-мат. наук: 01.04.13. – Ставрополь, 2004. – 359 с.

51. Пат. 1792919 СССР: МПК C02F1/28,1/48. Способ очистки воды от органических примесей / В. А. Чумаков, В. А. Ларичев, М. М. Загубытько и А. А. Харитоновна; заявитель и патентообладатель Днепропетровский горный институт им. Артемова. – № 408909, заявл. 29.05.1990, опубл. 07.02.1993, Бюл. № 5.

52. Пат. 2031849 Российская Федерация: МПК C02F1/28, B01J20/20. Способ извлечения нефти и нефтепродуктов из воды / Гафаров И. Г., Садыков А. Н., Мазур В. Н., Сунцова О. А., Лукач П., Сентдьердьи Г.; заявитель и патентообладатель Гафаров Илдар Гарифович. – № 5017327/26; заявл. 18.12.1991; опубл. 27.03.1995.

53. Пат. 2036843 Российская Федерация: МПК C02F1/28, B01J20/20. Способ удаления масляных загрязнений из воды / Гафаров И. Г.; Садыков А. Н.; Мазур В. Н.; Сунцова О. А.; Лукач П.; Сентдьердьи Г.; Сидельников А. А.; заявитель и патентообладатель Гафаров Илдар Гарифович. – №: 5027397/26; заявл. 17.02.1992; опубл. 09.06.1995.

54. Пат. 2047383 Российская Федерация: МПК B03C1/03. Роторный электромагнитный сепаратор для очистки технологических жидкостей от

слабомагнитных мелкодисперсных частиц / Ганзбург Л. Б., Лысов А. А., Стопский В. С. – № 5058157, заявл. 1992.08.25, опубл. 10.11.1995.

55. Пат. 2047384 Российская Федерация: МПК B03C1/03. Роторный электромагнитный сепаратор для очистки технологических жидкостей от мелкодисперсных ферромагнитных частиц / Ганзбург Л. Б., Лысов А. А., Стопский В. С. – № 5058159/03, заявл. 1992.08.25, опубл. 10.11.1995.

56. Пат. 2088534 Российская Федерация: МПК C02F1/28, B01J20/20. Порошкообразный сорбент для сбора нефти, масел и других углеводородов / В. И. Филиппов; Э. К. Добринский; С. И. Малашин; А. П. Сафонов; Г. А. Ленская; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "ИноТЭМ". – № 95118832/25, заявл. 04.11.1995, опубл. 27.08.1997.

57. Пат. 2156225 Российская Федерация, МПК C02F1/40, B01D17/05, C02F1/40, C02F101:32. Способ очистки сточных вод, содержащих эмульгированные нефтепродукты /В. М. Макаров; Л. А. Петрухно; Л. А. Тельцова; заявитель и патентообладатель Ярославский государственный технический университет. – № 99119876/12 ;заявл.16.09.1999; опубл.20.09.2000.

58. Пат. 2207913 Российская Федерация: МПК B03C1/00, B01D35/06, C10M175/04. Магнитный сепаратор / Булыжёв Е. М. , Афанасьев Е. П.; заявитель и патентообладатель Булыжёв Е. М. , Афанасьев Е. П. – № 2002111532/03, заявл. 2002.04.29, опубл. 10.07.2003.

59. Пат. 2226126 Российская Федерация: МПК B01J20/16, B01J20/26. Пористый магнитный сорбент / А. М. Тишин, Ю.И. Спичкин; заявитель и патентообладатель ООО "Перспективные магнитные технологии и консультации". – №: 2002135353/15, заявл. 30.12.2002, опубл. 27.03.2004.

60. Пат. 2232633 Российская Федерация: МПК B01J20/06, B01J20/22. Сорбент для очистки воды от углеводородов, способ его получения и способ очистки воды / Д.Ю. Блохин, О.Л. Ершов, Г.Я. Жигалин, П.К. Иванов, Р.С. Махлин, Н.Г. Мошечков, В.И. Филиппов; заявитель и патентообладатель ООО Научно-производственный центр "МедБиоСпектр". – № 2002103729/15, заявл. 15.02.2002, опубл. 20.07.2004.

61. Пат. 2263548 Российская Федерация: МПК B03C1/00. Способ извлечения магнитных частиц и магнитный сепаратор для его осуществления / Лаптев А.Б. – № 2004131312/03, заявл. 14.10.2004, опубл. 10.11.2005.

62. Пат. 2297390 Российская Федерация: МПК C02F1/40, B01D17/05, C02F1/40, C02F101:32. Способ очистки сточных вод, содержащих эмульгированные нефтепродукты / Макаров В.М.; Макарьин В. В.; Куликова Л.А.; заявитель и патентообладатель Ярославский государственный технический университет. – № 2005123217/15, заявл. 21.07.2005, опубл. 20.04.2007, Бюл. № 11.

63. Пат. 2317130 Российская Федерация: МПК B01D 35/06, B03C 1/00. Магнитный сепаратор / заявитель и патентообладатель ЗАО «Научно-производственное предприятие «Волга-ЭКОПРОМ». – № 2006118431/15, заявл. 26.05.2006, опубл. 20.09.2006.

64. Пат. 2348446 Российская Федерация: МПК B01D 35/06. Способ извлечения магнитных частиц из жидкой среды и магнитный сепаратор Булыжева для его реализации / Булыжёв Е. М. , Булыжёв Э. Е.; заявитель и патентообладатель Булыжёв Е. М. , Булыжёв Э. Е. – № 2007125224/15, заявл. 03.07.2007, опубл. 10.03.2009.

65. Пат. 2365420 Российская Федерация: МПК B03C1/00. Магнитный сепаратор, магнитовод и способ извлечения магнитных частиц из жидкой среды / Булыжёв Е. М. , Булыжёв Э. Е. – № 2008102887/03, заявл. 25.01.2008, опубл. 27.08.2009.

66. Пат. 2367515 Российская Федерация: МПК B01J20/10, B01J20/06, B01J20/22. Сорбент углеводов и липидов и способ его получения / В. И Филиппов, О. Л. Ершов, Г. Я. Жигалин; – № 2007148683/15, заявл. 28.12.2007, опубл. 20.09.2009, Бюл. № 26.

67. Пат. 2371232 Российская Федерация: МПК B01D17/06. Способ очистки водной среды от нефте- и маслопродуктов / А. Л.Бачурихин, А. В. Демин; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Региональная Экологическая Компания" (RU), Учреждение

Российской академии наук Институт органической химии Н.Д.Зелинского (RU). – № 2008126065/15, заявл. 27.06.2008, опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30.

68. Пат. 2372135 Российская Федерация: МПК В01Д 35/06. Устройство для извлечения магнитных частиц из жидкой среды / Булыжёв Е. М. , Булыжёв Э. Е.; заявитель и патентообладатель ЗАО "Булыжев. Промышленные экосистемы. – № 2008101983/15, заявл. 18.01.2008, опубл. 10.11.2009.

69. Пат. 2410332 Российская Федерация: МПК С02F1/48. Способ коагуляции и удаления ферромагнитных частиц из потока жидкости или газа / В. В. Шайдаков, С. Ф. Урманчеев, О. Ю. Порлетаева и др. ; заявитель и патентообладатель ООО "Инжиниринговая компания "ИНКОМП-НЕФТЬ" (RU), Учреждение Российской академии наук Институт механики Уфимского научного центра Российской академии наук (RU). – № 2009128436/05, заявл.22.07.2009, опубл.27.01.2011.

70. Пат. 2460584 Российская Федерация: МПК В03С 1/10. МАГНИТНЫЙ СЕПАРАТОР / Кармазин В.В., Андреев В. Г. и др. ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный горный университет – № 2011107577/03, заявл. 01.03.2011, опубл. 10.09.2012.

71. Пат. 2462303 Российская Федерация: МПК В01J20/10, В01J20/06, В01J20/22. Порошкообразный магнитный сорбент для сбора нефти, масел и других углеводородов/Ю. А. Миргород, С. Г. Емельянов, Н. А. Борщ, В. М. Федосюк, С. С. Хотынюк; заявитель и патентообладательФГБОУ ВПО "Юго-Западный государственный университет" (ЮЗГУ) (RU). – № 2010150749/05; заявл. 10.12.2010, опубл. 27.09.2012, Бюл. № 27. – 6 с.

72. Пат. 2466238 Российская Федерация: МПК Е02В 15/04, С02F 1/48. Способ сбора с поверхности воды разливов нефти/ В. В. Шайдаков, А. А. Селуянов, О. Ю. Полетаева, Е. В. Шайдаков, Е. В. Чернова; заявитель и патентообладатель ООО "Инжиниринговая компания "ИНКОМП-НЕФТЬ. – 2011119014/13, заявл. 12.05.2011, опубл. 10.11.2012, Бюл. № 31.

73. Пат. 250295 СССР: МПК G 01г. Способ измерения градиента магнитного поля / П. М. Кохбан, И. Б. Кенигсберг, И. Н. Шереметьева. – № 1247787 заявл. 4.06.1968, опубл. 13.01.1970, Бюл. № 5.
74. Петров, Ю. И. Физика малых частиц / Ю. И. Петров. – М.: Наука, 1982. – 359 с.
75. Петухов, О. А. Моделирование : системное , имитационное , аналитическое : учеб. пособие / О. А. Петухов , А. В. Морозов , Е. О. Петухова . – 2- е изд ., испр . и доп . – СПб .: СЗТУ, 2008. – 288 с .
76. Прохоров, А. М. Физическая энциклопедия / А. М. Прохоров – М.: Советская энциклопедия, 1988. – 704 с.
77. Розенцверг, Р. Е. Феррогидродинамика / Р. Е. Розенцверг; Пер. с англ. В. В. Кирюшина; под ред. В. В. Гогосова. – М.: Мир, 1989. – 356 с.
78. Сазанов, В. Е. Повышение эффективности шлифования стальных заготовок путем очистки СОЖ в электромагнитных сепараторах: дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Сазанов Валентин Евгеньевич. – Ульяновск: Ульян. политехн. ин-т., 1990. – 264 с.
79. Синдо, Д. Аналитическая просвечивающая микроскопия / Д. Синдо, Т. Окиава. – М.: Техносфера, 2006.– 256 с.
80. Смирнов, Ю. Г. Математическое моделирование процесса очистки сточных вод от нефти с использованием магнитных наночастиц / Ю. Г. Смирнов // Известия Коми научного центра Уро РАН. – 2012. – №2(10) . – С.104-107.
81. Советов, Б. Я. Моделирование систем : учебник для вузов / Б. Я. Советов , С. А. Яковлев . – М .: Высш . школа, 2005. – 343 с .
82. Стахов, Е. А. Очистка нефтесодержащих сточных вод предприятий хранения транспорта нефтепродуктов / Е. А. Стахов. – Л.: Недра, 1983. – 264 с.
83. Сысоева, С. Развитие концепции математического и расчетного моделирования / Светлана Сысоева // Компоненты и технологии. – 2007. – №12. – С. 72-80.

84. Татур, Т. А. Основы теории электромагнитного поля: Справочное пособие для электротехнических спец. вузов. / Т. А. Татур. – М.: Высшая школа, 1989. – 271 с.
85. Тетельмин, В. В. Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе: учебное пособие / В. В. Тетельмин, В. А. Язев. – Долгопрудный: «Интеллект», 2009. – 352 с.
86. Фертман, В. Е. Магнитные жидкости: Справочное пособие / В. Е. Фертман. – Минск: Высшая школа, 1988. – 184 с.
87. Фризен, В. Э. Методы расчета электрических и магнитных полей : учебный комплект / В. Э. Фризен, И. В. Черных, С. А. Бычков, Ф. Е. Тарасов. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. – 176 с.
88. Цхадая Н. Д. Обоснование параметров конструкции неодимового магнитного сепаратора для очистки пластовых вод / Н. Д. Цхадая, И. Ю. Быков, И. Ф. Чупров, Т. Д. Ланина, Ю. Г. Смирнов, А. А. Лютоев // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 8. – С. 112–115
89. Черненко, Т. В. Методы очистки сточных вод от нефтепродуктов / Т. В. Черненко, Г. К. Иматуллина, Д. А. Резуанов, А. Т. Киреева, А. К. Халитов // Сборник научных трудов "Проблемы и перспективы современной науки". – Томск. – 2011. – Т. 3. – №1.
90. Черных, И. В. Моделирование устройств индукционного нагрева с помощью пакета ELCUT / И. В. Черных // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – №2. – С. 4–8.
91. Чернышов, В. Н.. Теория систем и системный анализ / В. Н. Чернышов, А. В. Чернышов. – Тамбов: ТГТУ, 2008. – 96 с.
92. Чулок, А. И. Математическое моделирование автоматизированного проектирования систем применения СОЖ / А. И. Чулок // Автоматизированные системы проектирования и управления. – М. :ВНИИТЭМР, 1987. – Сер. 3. – Вып. 5. – 82 с. 135.
93. Чулок, А. И. Математическое моделирование автоматизированного проектирования систем применения СОЖ / А. И. Чулок // Автоматизированные

системы проектирования и управления. – М. : ВНИИТЭМР, 1987. – Сер. 3. – Вып. 5. – 82 с.

94. Чулок, А. И. Модульный принцип построения математических процессов гибкой технологии применения СОЖ / А. И. Чулок // Технологические процессы производства режущего инструмента с применением промышленных роботов и станков с ЧПУ . – М. : ВНИИинструмент, 1986. – С. 51 - 58.

95. Шабанова, Н.А. Химия и технология нанодисперсных оксидов / Н. А. Шабанова, В. В. Попов, П. Д. Саркисов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – С. 309.

96. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя /Г. Шлихтинг; перевод с немецкого Г. А. Вольперта; под ред. Л. Г. Лойцянского. – М.: «Наука» Главная редакция физико-математической литературы, 1974. – 712 с.

97. Шункевич, Т. М. Дисперсность магнетита в некоторых ферромагнитных коллоидах / Т. М. Шункевич, А. И. Лесникович, М. В. Байков, С. А. Воробьева // Коллоидн. журнал. – 1983. – Т. 45, вып. 5. – С. 1030-1032.

98. Brown, W. F. Magnetic interactions of superparamagnetic particles / W. F. Brown // J. Appl. Phys. – 1967. – V 38, №3. – P. 1017 - 1018.

99. Chen, C. Particle size effects and surface anisotropy in Fe-based granular films /C. Chen, O. Kitakami, Y. Shimada // J. Appl. Phys. – 1998. – V. 84. – P. 2184 - 2189.

100. Drbohlavova, J. Preparation and Properties of Various Magnetic Nanoparticles / J. Drbohlavova, R. Hrdy, A. Vojtech, R. Kizek, O. Schneeweiss and J. Hubalek // Sensors. – 2009. – V. 9. – P.2352 - 2362.

101. Elizabeth, P. Nanotechnology yields transparent magnet-tiny iron oxide particles become more transparent than in bulk form – brief article / P. Elizabeth //Science News. – 1992, July 11.

102. Elmore, W. C. Ferromagnetic colloid for studying magnetic structure / W. C. Elmore // Phys. Rew. – 1938. – Vol. 54, № 4. – P. 309.

103. Enkin, R.J. A micromagnetic study of pseudo-single-domain remanence in magnetite / R.J.Enkin, D.J.Dunlop // J. Geophys.Res. – 1987. – V. 92. – P. 12726 - 12740.
104. Gaussmeter Model GM2 Instructions / AlphaLab.Inc. – URL: <https://www.trifield.com/UserFiles/GM2%202012.pdf>
105. Hayes, C. F. Observation of association in a ferromagnetic colloid / C. F. Hayes // J. Colloid and Interface Sci. – 1975. – Vol. 52, N 2. – P. 239-243.
106. Klimpke, B. A Hybrid Magnetic Field Solver Using a Combined Finite Element/Boundary Element Field Solver. Integrated Engineering Software/Enginia Research. Presented at the U.K. Magnetics Society Conference. "Advanced Electromagnetic Modelling & CAD for Industrial Application". – 2003. – URL : <https://www.integratedsoft.com/papers/research/Hybrid.pdf>
107. Kruglyakov, P. M. Hydrophile-Lipophile Balance of Surfactants and Solid Particles. Physicochemical Aspects and Applications / P. M. Kruglyakov. – Amsterdam: Elsevier, 2000.
108. Leslie-Pelecky, D. L. Magnetic Properties of Nanostructured Materials / D. L. Leslie-Pelecky, D. R. Rieke // Chem. Mater. – 1996. – Vol. 8. – P. 1770 - 1783.
109. Lu Hua The micromagnetics of cubic particles with cubic anisotropy favouring body diagonal magnetization / L. Hua, J. E. L. Bishop, J. W. Tucker // JMMM.– 1994. – V. 131. – P. 285–294.
110. Massart, R. Preparation of aqueous magnetic liquids in alkaline and acidic media / R. Massart // IEEE Trans. Magn.– 1981.– Vol.17.– P. 1247–1248.
111. Moeser, G. D. Water-based magnetic fluids as extractants for synthetic organic compounds / G. D. Moeser, K. A. Roach, W. H. Green, P. E. Laibinis, T. A. Hatton // Ind. Eng.Chem.Res. – 2002. – V. 41. – P.4739 - 4749.
112. Neel, L. Influence des fluctuations thermique sur l'aimantation de grains ferromagnetiguetres fins / L. Neel // Acad. des scienees. Comptes rendus. – 1949. – V. 228, №8. – P.664 - 666.

113. Neel, L. Theorie du trianage magnetique des ferromagnetiques en grains fins avec applications aux terres cuites / L. Neel // Ann. Geophys. – 1949. – V. 5, № 2. – P. 99 - 120.
114. Oder, R. R. Emulsions breaking with magnetic fields / R. R. Oder // American filtration society, 18th annual conference. – Atlanta, 2005, April 10-13. – 25 p. – URL : http://www.magneticseparation.com/UserFiles/File/AFS_2005.pdf.
115. Patent 3215572 USA: C1.149-2. Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles / Papell, S. S. – USA, 1965.
116. Patent 3764540 USA: Int. Cl. H01 C 11/28. Magnetofluids and their manufacture / S. E. Khalafalla, G. W. Reimers. – USA, 1973.
117. Peterson, E. A. Reversible, field induced agglomeration in magnetic colloid / E. A. Peterson, D. A. Krueger // J. Colloid and Interface Sci. – 1977. – Vol. 62, № 1. – P. 24-33.
118. Ponder, S. M. Surface chemistry and electrochemistry of supported zerovalent iron nanoparticles in the remediation of aqueous metal contaminants / S. M. Ponder, J.G. Darab, J. Bucher, D. Gaulder // Chem. Mater. – 2001. – Vol.13. – P.479-486.
119. Schabes, M. E. Magnetization processes in ferrimagnetic cubes / H. N. Bertram, M. E. Schabes // J. Appl. Phys. – 1988. – V. 64 (3). – P.1347 - 1357.
120. Schabes, M. E. Micromagnetic theory of non-uniform magnetization processes in magnetic recording particles // JMMM. – 1991. – Vol. 95. – P. 249–288.
121. Sorensen, C. M. Magnetism // In nanoscale materials in chemistry. Edited by Kenneth J. Klabunde. – New York, 2001. – P. 169-223. – URL: <http://f3.tiera.ru/3/Chemistry/Solid%20state%20chemistry> .
122. Stoner, E. C. Mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys / E. C. Stoner, E. P. Wohlfarth // Phil. Trans. Roy. Soc. – 1948. – Vol. 240. – P. 599-642.
123. Sullivan, A. P. The effect of inorganic solid particles on water and crude oil emulsion stability / A. P. Sullivan, P. K. Kilpatrick // Ind. Eng. Chem. Res. – 2002. – Vol.41. – P.3389-3404.

Приложение 1.

Программа в пакете Mathcad для расчета производительности магнитного сепаратора с ферромагнитным картриджем

$a := 0.3$	сторона магнита (м)		
$R_s := 0.45$	радиус магнитного сепаратора (М)		
$S_{pol} := R_s^2 \cdot \pi - a^2 \rightarrow 0.54617251235193313079$	полная рабочая площадь (м ²)		
$k := 0.5$	коэффициент упаковки на поверхности эмульсии		
$dem := 10 \cdot 10^{-6}$	диаметр эмульсии (м)		
$dch := 10 \cdot 10^{-9}$	диаметр частиц магнетита (м)		
$L_s := 0.5$	длина сепаратора (м)		
$M_{nas} := 4.78 \cdot 10^5$	намагниченность магнетита при насыщении (А/м)		
$\eta := 0.89 \cdot 10^{-3}$	динамическая вязкость (Па·с)		
$m := 0.004$	толщина стержней (м)		
$d := 0.006$	расстояние между стержнями (м)		
$gradB := 20$	градиент магнитного поля (Тл/м)		
$S_{romb} := (m + d) \cdot m$	площадь ромбовидной части модели (м ²)		
$S_{st} := \frac{\pi \cdot m^2}{4}$	площадь стержней (м ²)		
$\varphi := \frac{S_{romb} - S_{st}}{S_{romb}} \rightarrow 0.68584073464102067615$	коэффициент упаковки на поверхности нефтяной капли		
$V := \frac{4 S_{pol} \cdot \varphi \cdot k \cdot dem \cdot dch \cdot L_s \cdot M_{nas} \cdot gradB}{9 \cdot \eta \cdot d} \rightarrow 0.00745121750726686975769$	объем пропускной магнитного сепаратора (м ³ /с)		
$v_{em} := \frac{2k \cdot dem \cdot dch \cdot M_{nas} \cdot gradB}{9 \cdot \eta} \rightarrow 0.00011935081148564294632$	скорость эмульсии (м/с)		
$T := \frac{d}{2 \cdot v_{em}} \rightarrow 25.1359832635983263592226$	время захвата (с)		
$V_{pot} := \frac{4k \cdot dem \cdot dch \cdot L_s \cdot M_{nas} \cdot gradB}{9 \cdot \eta \cdot d} \rightarrow 0.019891801914273824386$	скорость потока (м/с)		

Приложение 2.

Расчетные программы в пакете Matlab

```
% Время релаксации для частиц магнетита %
Kb=1.38*10^(-23); % постоянная Больцмана Дж/К
T=300; % температура К
k=11000; % кристаллографическая анизотропия
To=10^(-9);
d=23*10^(-9):0.5*10^(-9):26*10^(-9); % распределение размеров частиц
E=k*(3.14*d.^3)/6;
s=E./(T*Kb);
Tre=To.*(s.^(-0.5)).*exp(E./(T*Kb)); % время релаксации
Tre
plot(d,Tre,'k','LineWidth',2);
xlabel('размер частицы (м)');
ylabel('время релаксации (с)');

% расчет намагниченности для частиц размером 4, 12 и 18 нм %
%N=1; % число частиц в образце
Kb=1.38*10^(-23); % постоянная Больцмана Дж/К
T=300; % температура К
Ms=4.7*10^5; % намагниченность насыщения объемного магнетита
mo=4*3.14*10^(-7); % магнитная постоянная
H=0:150:500000; % напряженность магнитного поля А/М
mef1=25*10^(-20); % магнитный момент А*М2 (4 нм)
d=4*10^(-9); % диаметр частицы
V=(3.14*d^3)/6; % объем частицы
z=(3.14*mo*Ms*V.*H)/(Kb*T); % Ланжевеновский аргумент
M=(coth(z)-1./z); % Определение намагниченности для одной частицы А/м
mef2=666*10^(-20); % расчет в А*М2 (12 нм)
d2=12*10^(-9);
V2=(3.14*d2^3)/6;
z2=(3.14*mo*Ms*V2.*H)/(Kb*T);
M2=(coth(z2)-1./z2); % Определение намагниченности для одной частицы А/м
mef3=2247*10^(-20); % магнитный момент А*М2 (18 нм)
d3=18*10^(-9); % диаметр частицы
V3=(3.14*d3^3)/6; % объем частицы
z3=(3.14*mo*Ms*V3.*H)/(Kb*T); % Ланжевеновский аргумент
M3=(coth(z3)-1./z3); % Определение намагниченности для одной частицы А/м
plot(H,M,'k-'); % для 4 нм
hold on
plot(H,M2,'k'); % для 12 нм
hold on
plot(H,M3,'k','LineWidth',2); % для 18 нм
xlabel('H(A/m)');
ylabel('M /φ*Мнас');

% Влияние температуры на намагниченность магнетита
%N=1; % число частиц в образце
Kb=1.38*10^(-23); % постоянная Больцмана Дж/К
T1=300; % температура К
```

```

T2=500;
Ms=4.7*10^5;%намагниченность насыщения объемного магнетита
mo=4*3.14*10^(-7); % магнитная постоянная
H=10:10:500000; % напряженность магнитного поля А/М
d=10*10^(-9);% диаметр частицы
V=(3.14*d^3)/6; %объем частицы
z=(3.14*mo*Ms*V.*H)/(Kb*T1);% Ланжевеновский аргумент
M=(coth(z)-1./z);%Определение намагниченности для одной частицы А/м
d=10*10^(-9);% диаметр частицы
V=(3.14*d^3)/6; %объем частицы
z2=(3.14*mo*Ms*V.*H)/(Kb*T2);% Ланжевеновский аргумент
M2=(coth(z2)-1./z2);%Определение намагниченности для одной частицы А/м
plot(H,M,'k-');% для 4 нм
hold on
plot(H,M2,'r');% для 12 нм
xlabel('H (А/м)');
ylabel('M/φ*Мнас');

```

```

%расчет седиментационной устойчивости частиц в воде %
a=5200; % плотность частицы кг/м3
L=1000; % плотность воды кг/м3
g=9.8 ;% ускорение свободного падения м/с2
n=0.89*10^(-3); % динамическая вязкость воды Па*с
T=300; % температура окружающей среды
Kb=1.38*10^(-23)% постоянная Больцмана Дж/К
d=20*10^(-9):100*10^(-9):10*10^(-6); % размер магнитной наночастицы нм
Vgr=((a-L)*g.*d.^2)./(18*n);% скорость оседания магнитных частиц
m=a*(3.14.*(d.^3)/6); %масса частицы
Vt=sqrt(3*Kb*T./m); % скорость теплового движения
semilogy(d,Vgr,'--','lineWidth',2);% график скорости оседания м/с
hold on
semilogy(d,Vt,'k','lineWidth',2); % график скорости теплового движения магнитных
частиц м/с
xlabel('размер (м)');
ylabel('скорость (м/с)');

```

```

%Образование агрегатов
[t, d] = meshgrid(1*10^(-9):.1*10^(-9):4*10^(-9), 10*10^(-9):.2*10^(-9):20*10^(-9));
%t- толщина адсорбента на поверхности сферы
%d - диаметр частицы
%s - расстояние между поверхностями сфер s=2*t;
L=2*s./d;
A=10^(-19);% константа Гамакера дж
E=(-A/6)*(2./(L.*L+4*L)+(2./(L+2).^2)+Log10((L.*L+4*L)./(L+2).^2));
surf(t,d,E)
shading interp
colorbar
% по предложению гамакера

```

```

% Магнитный момент частицы магнетит с различными размерами%
T=300; % температура К
Msat=4.7*10^5

```

```

d=5*10^(-9):10^(-9):20*10^(-9);% распределение размеров частиц
V=3.14.*(d.^3)/6;% объем частицы
mef=V.*Msat;% расчет эффективного магнитного момента A*M2
mef
plot(d,mef)
xlabel('размер частицы (метр)');
ylabel('Магнитный момент Am^2');

```

```

% Скорость экстракции омагниченных капель%
M=4*10^3; %намагниченность A/m
d=5*10^(-6);% размер м
d1=15*10^(-6);% размер м
d2=25*10^(-6);% размер м
n=0.89*10^(-3);% вязкость Па*с
z=0:1*10^(-3):5*10^(-2) % расстояние до полюсов
v=((d*d*M)/(18*n))*61.61*exp(-133.3.*z)*3600 % скорость м/ч
v1=((d1*d1*M)/(18*n))*61.61*exp(-133.3.*z)*3600% скорость м/ч
v2=((d2*d2*M)/(18*n))*61.61*exp(-133.3.*z)*3600% скорость м/ч
plot(z,v,'k--');% для 5 мкм
hold on
plot(z,v1,'k');% для 15 мкм
hold on
plot(z,v2,'k','LineWidth',2);% для 25 мкм
xlabel('m');
ylabel('m/ch');

```

% скорость извлечение капель покрытых монослоем магнитных наночасти в поле неодимовых магнитов

```

dem=100*10^(-6);%размер капли нефти
dch=10*10^(-9);%размер магнитной частицы
Ms=4.78*10^5;%намагниченность насыщения магнетита A/m
nv=0.89*10^(-3);%вязкость воды па*с
k=0.5; %магнитная упаковка
Kb=1.38*10^(-23); % постоянная Больцмана ДЖ/К
T=300;
x=0:1*10^(-3):3*10^(-2); %расстояние до полюса магнита от 0 до 5 см
B=0.5438*exp(-133.3*x);% магнитная индукция неодимового магнита
fi=4*k*dch/dem; %ОБЪЕМНАЯ ДОЛЯ МАГNETИТА В КАПЛЕ
Vch=(3.14*dch^3)/6; % объем магнитной наночастицы
z=(Ms*Vch.*B)/(Kb*T);% Ланжевенский аргумент
M=Ms*fi*(coth(z)-1./z)% намагничивание
L=(coth(z)-1./z);% ланжевен
v=((4*k*dem*dch*Ms*L)/(18*nv)).*61.61.*exp(-133.3.*x)% скорость м/сек
%график намагниченности
%hold on
%plot(x,M,'*');% график намагниченности A/m
%xlabel('Расстояние (м)');
%ylabel('намагниченность капли (A/m)');
%hold off
%text(0.005,100,['dch=5 нм ',]);
%text(0.005,800,['dch=10 нм ',]);
%text(0.005,1200,['dch=15 нм ',]);
%text(0.005,1800,['dch=20 нм ',]);
%text(0.03,1600,['Диаметрэмульсии 10 мкм ',]);

```

```

hold on
plot(x*1000,v*60*1000,'k-^');% график скорости мм/мин
hold off
xlabel('Расстояние до полюса магнита (мм)');
ylabel('Скорость (мм/мин)');
text(2,15,['Диаметр частиц магнетита 10 нм ',]);
legend('dэм=10 мкм', 'dэм=30 мкм', 'dэм=50 мкм', 'dэм=100 мкм' )
y=1./v;
I=trapz(x, y);
T=I/60% время мин
vsr=(0.02/I)*60*1000% мм/мин

```

```

% скорость извлечение капель покрытых слоем магнитных агрегатов на макете
сепаратора
dem=20*10^(-6);%размер капли нефти
dch=0.8*10^(-6);%размер магнитной частицы
Ms=4.78*10^5;%предположенная намагниченность насыщения аг-регатов магнетита А/м
nv=0.89*10^(-3);%вязкость воды па*с
k=0.5; %магнитная упаковка
Kb=1.38*10^(-23); % постоянная Больцмана Дж/К
T=300;
% vsr=0;
x=0:1*10^(-4):1*10^(-3); %расстояние до полюса магни-та от 0 до 1 мм
B=0.01731*exp(-4.207*x)+0.2243*exp(-0.003814*x);% маг-нитная индукция неодимового
магнита
fi=4*k*dch/dem; %ОБЪЕМНАЯ ДОЛЯ МАГNETИТА В КАПЛЕ
Vch=(3.14*dch^3)/6; % объем магнитной наночастицы
z=(Ms*Vch.*B)/(Kb*T);% Ланжевенковский аргумент
M=Ms*fi*(coth(z)-1./z)% намагничивание
L=(coth(z)-1./z);% ланжевен
v=((4*k*dem*dch*Ms*L)/(18*nv)).*(0.0728.*exp(-4.207*x)+0.000855.*exp(-0.003814.*x))%
скорость м/с
hold on
plot(x*1000,v*60*1000,'k-^');% мм/ график скорости мм/мин
hold off
xlabel('Расстояние до стержня (мм)');
ylabel('Скорость (мм/мин)');
text(2,15,['Диаметр частиц магнетита 10 нм ',]);
legend('dэм=10 мкм', 'dэм=30 мкм', 'dэм=50 мкм', 'dэм=100 мкм' )
% Расчет средней скорости на участке
y=1./v;
I=trapz(x, y);% время сек
vsr=(10^(-3)/I)*60*1000 %мм/мин
Vprotoc=(0.18/I)*3600 %скорость м/ч
T=I/60% мин

```

```

%Интерполирование логнормального распределения нанодисперсных частиц магнетита
clear all
clc
d = [2 4 6 8];
f = [0.774 0.166 0.048 0.012];
%f = f/sum(f); % нормируем
% записываем выражение для аппроксимирующей функции

```

```

myfit = fittype('A*exp(-(log(x)-a).^2/(2*s^2))./(x*s*sqrt(2*pi))');
% интерполируем полученную функцию по таблице значений
ln_fit = fit(d,f,myfit)
% выражаем коэффициенты из интерполируемой функции
a = ln_fit.a;
s = ln_fit.s;
A = ln_fit.A;
% получаем точки интерполируемой функции
xf = 0:0.01:max(d);
yf = ln_fit(xf);
% рисуем графики функций
plot(d,f,'-b',...
     xf,yf,'-r')
m1 = exp(a+s^2/2); % математическое ожидание
m2 = (exp(s^2)-1)*exp(2*a+s^2);% дисперсия
m3 = exp(a-s^2);% мода
R = sqrt(m2);% среднеквадр. отклонени
p=(1+erf((log(2)-a)/(s*sqrt(2))))*0.5;
legend('Точки данных', 'Результат интерполяции')
text(5,1,['Mx = ',num2str(m1)]);
text(5,0.9,['sigma = ',num2str(R)]);
text(5,0.8,['Mo = ',num2str(m3)]);
text(5,0.7,['P(0<x<2) = ',num2str(p)]);
clc
% результаты на экране
disp(['Параметры распределения: mu=',num2str(a)])
disp(['Параметры распределения: sigma=',num2str(s)])
disp(['Мат. ожидание: ',num2str(m1)])
disp(['Дисперсия: ',num2str(m2)])
disp(['Мода: ',num2str(m3)])
disp(['Среднеквадр. отклонение: ',num2str((R)) ])
disp(['Вероятность попадания в интервал P(0<x<2): ',num2str((p)) ])

```

Для определения оптимальной концентрации магнетита при очистке пластовой воды
clear, clc

```

Cneft=50*10^(-3); %концентрация нефтепродуктов кг/м3
Pfl=800; %плотность нефти кг/м3
Pmch= 5700; %плотность магнетита кг/м3
dem=10^(-5); %средний размер эмульсионных капель (м)

```

```

Dmch=10^(-8):10^(-7):6*10^(-6); %размеры магнитных частиц (м)
Cmch=10^(-2):10^(-2):0.5; % концентрация магнитных частиц (кг/м3)
% [Dmch,Cmch]=meshgrid(10^(-7):10^(-7):8*10^(-7),10^(-2):10^(-2):0.1)

```

```

for i=1:length(Dmch);
for j=1:length(Cmch);
Voem=Cneft/Pfl; %объем нефтепродуктов на куб воды м3
Kem=(Voem*6)/(3.14*dem^3); % среднее количество капель нефти в объеме (шт)
Soem=3.14*Kem*dem^2; %расчет суммарной площади поверхности нефтепродуктов(м2)
Kmch=(4*Kem*dem^2)/Dmch(i)^2; % расчет количества магнитных частиц (шт)
Vomch=(Kmch*Dmch(i)^3)/6; % общий объем магнитных частиц м3
Copt(i,j)=Vomch*Pmch; % требуемая масса кг маг. част. на 1 м3 воды
if (Copt(i,j)>Cmch(j));

```



```

        Ef(i,j)=Cmch(j)/Copt(i,j);
    else (Copt(i,j)<Cmch(j));
        Ef(i,j)=Copt(i,j)/Cmch(j);
    end
end
end
[y,x]=meshgrid(Cmch,Dmch);
M = [1.9*10^(-6) 0 0;
1.8*10^(-6) 2*10^(-3) 0.582;
1.8*10^(-6) 21.3*10^(-3) 0.736;
1.8*10^(-6) 41.6*10^(-3) 0.5672;
1.8*10^(-6) 50*10^(-3) 0.407;
1.9*10^(-6) 140*10^(-3) 0.573;
1.8*10^(-6) 100*10^(-3) 0.603;
1.8*10^(-6) 500*10^(-3) 0.773;
5.9*10^(-6) 0 0;
5.9*10^(-6) 1000*10^(-3) 0.8729;
5.9*10^(-6) 140*10^(-3) 0.408;
5.9*10^(-6) 500*10^(-3) 0.578];
x1 = M(:,1);
y1 = M(:,2);
z1 = M(:,3);
x1i = linspace(10^(-8), 6*10^(-6), length(Dmch));
y1i = linspace(10^(-2), 0.5, length(Cmch));
[ Y, X] = meshgrid( y1i, x1i);
Z = griddata(x1,y1,z1, X,Y, 'cubic');
cell=0.4*Ef+0.6*Z;
surf(x,y,cell,'FaceAlpha',0.7)

```

Приложение 3.

Общество с ограниченной ответственностью «Лабораторный центр «ИКОС»»

169300, Республика Коми, город Ухта, пр. Космонавтов, 44
 ikos.2012@mail.ru, т. 74-08-33, ф. 742400
 ИНН/КПП 1102070810/110201001



УТВЕРЖДАЮ
 Директор ООО
 «Лабораторный центр «ИКОС»»
 З.И. Перхуткина
 29.10.2013

Протокол исследований проб воды

от 29 октября 2013 г. № 2.3.2013

1. Наименование заказчика:

частное лицо аспирант Ухтинского Государственного Технического Университета Лютоев А.А.

2. Адрес заказчика:

169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Юбилейная, дом 26, комната 251

3. Наименование исследуемого объекта:

Вода пластовая с Нижнечутинского нефтяного месторождения

4. Основание для проведения измерений:

Договор № 001/2013 от 25.09.2013

5. Дата отбора проб:

29.10.2013

6. НТД на отбор проб:

ГОСТ Р 51592-2000 Вода. Общие требования к отбору проб.

7. Условия транспортировки и хранения:

При температуре не более +4 °С

Дата проведения исследований:

29.10.2013

8. Средства измерения:

Анализатор жидкости Флюорат 02-3М

9. НТД на проведение исследований:

ПНД Ф 14.1:2:4.128-98 (издание 2012 года). Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости "Флюорат-02"

10. Результаты исследований:

№ пробы	1	2	3	4	5	6
Концентрация нефтепродуктов, мг/дм ³	4, 83 ± 1,2	9, 02 ± 2,25	12,50 ± 3,12	12,25 ± 3,06	8,85 ± 2,21	21,07 ± 5,26

Ответственный за проведение исследований

и оформление протокола начальник испытательной лаборатории

Н.В. Шкляева

**Общество с ограниченной ответственностью
«Лабораторный центр «ИКОС»**

169300, Республика Коми, город Ухта, пр. Космонавтов, 44
ikos.2012@mail.ru, т. 74-08-33, ф. 742400
ИНН/КПП 1102070810/110201001



УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО
«Лабораторный центр «ИКОС»
З.И. Перхуткина
27.09.2013

**Протокол исследований
проб воды**

от 26 сентября 2013 г. № 2.1.2013

1. Наименование заказчика:

частное лицо аспирант Ухтинского Государственного Технического Университета Лютоев А.А.

2. Адрес заказчика:

169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Юбилейная, дом 26, комната 251

3. Наименование исследуемого объекта:

Вода пластовая с Ярегского нефтяного месторождения

4. Основание для проведения измерений:

Договор № 001/2013 от 25.09.2013

5. Дата отбора проб:

18.09.2013

6. НТД на отбор проб:

ГОСТ Р 51592-2000 Вода. Общие требования к отбору проб.

7. Условия транспортировки и хранения:

При температуре не более +4 °С в бутылках темного стекла

Дата проведения исследований:

19.09.2013

7. Средства измерения:

Анализатор жидкости Флюорат 02-3М

8. НТД на проведение исследований:

ПНД Ф 14.1:2:4.128-98 (издание 2012 года). Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости "Флюорат-02"

9. Результаты исследований:

№ пробы	1	2	3	4	5	6
Концентрация нефтепродуктов, мг/дм ³	37,17 ± 9,30	15,25 ± 3,81	7,33 ± 1,83	20,13 ± 5,03	9,87 ± 2,47	16,1 ± 4,03

Ответственный за проведение исследований

и оформление протокола начальник испытательной лаборатории  Н.В. Шкляева

**Общество с ограниченной ответственностью
«Лабораторный центр «ИКОС»»**

169300, Республика Коми, город Ухта, пр. Космонавтов, 44
 ikos.2012@mail.ru, т. 74-08-33, ф. 742400
 ИНН/КПП 1102070810/110201001



УТВЕРЖДАЮ
 Директор ООО
 «Лабораторный центр «ИКОС»»
 З.И. Перхуткина
 27.09.2013

**Протокол исследований
 проб воды**
 от 26 сентября 2013 г. № 2.2.2013

1. Наименование заказчика:

частное лицо аспирант Ухтинского Государственного Технического Университета Лютоев А.А.

2. Адрес заказчика:

169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Юбилейная, дом 26, комната 251

3. Наименование исследуемого объекта:

Вода пластовая с Ярегского нефтяного месторождения

4. Основание для проведения измерений:

Договор № 001/2013 от 25.09.2013

5. Дата отбора проб:

22.09.2013

6. НТД на отбор проб:

ГОСТ Р 51592-2000 Вода. Общие требования к отбору проб.

7. Условия транспортировки и хранения:

При температуре не более +4 °С

Дата проведения исследований:

23.09.2013

8. Средства измерения:

Анализатор жидкости Флюорат 02-3М


9. НТД на проведение исследований:

ПНД Ф 14.1:2:4.128-98 (издание 2012 года). Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости "Флюорат-02"

10. Результаты исследований:

№ пробы	1	2	3	4	5	6
Концентрация нефтепродуктов, мг/дм ³	2,00 ± 0,5	2,10 ± 0,53	2,14 ± 0,54	2,30 ± 0,58	2,57 ± 0,65	3,22 ± 0,81


Ответственный за проведение исследований

и оформление протокола начальник испытательной лаборатории  Н.В. Шкляева

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека
 ФБУЗ «ЦЕНТР ГИГИЕНЫ И ЭПИДЕМИОЛОГИИ В РЕСПУБЛИКЕ КОМИ»
**ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
 «ЦЕНТР ГИГИЕНЫ И ЭПИДЕМИОЛОГИИ В РЕСПУБЛИКЕ КОМИ В ГОРОДЕ УХТЕ»**
 Свидетельство об аккредитации экспертной организации от 04.03.2010 № 70-АК, действительно до 04.03.2015,
 выдано Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека
АККРЕДИТОВАННЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ЦЕНТР

Юридический адрес:	167001, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Димитрова, д. 3/3	Аттестат аккредитации № ГСЭН.RU.Ц0А.004.01 от 23 января 2009 года Зарегистрирован в Едином реестре:
Адрес лаборатории:	169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Севастопольская, 1	
Тел./факс:	(8-8216) 75-09-83	№ РОСС RU.0001.510872 от 23 января 2009 года Действителен до 23 января 2014 года
ОКПО 75775049, ОГРН 105110046114 ИНН 1101486406, КПП 110202001		

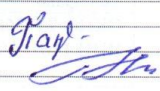
**ПРОТОКОЛ
 ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
 № 1578 от 28.06.2013**

Наименование пробы (образца)	Вода пластиковая (без обработки)
Пробы (образцы) направлены (наименование, адрес, подразделение организации, направившей пробы)	Филиал ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Коми в городе Ухте», пом. врача по общей гигиене Аллаярова А.Э.
Дата отбора пробы (образца)	22.06.2013
Дата доставки пробы (образца)	24.06.2013 12 ч 00 мин.
Цель отбора	На содержание нефтепродуктов. По договору Ухт00032 от 14.06.2013
Юридическое лицо, индивидуальный предприниматель или физическое лицо, у которого отбирались пробы (образцы)	Физическое лицо Лютоев А.А., 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Юбилейная, д. 26, к. 257.
Объект, где производился отбор пробы (образца) (наименование, фактический адрес)	Нижнечучинское месторождение, пластиковая вода без обработки. Республика Коми.
Код пробы (образца)	1.13.1578.1.1.
Изготовитель (наименование, фактический адрес (страна, регион и т.д.))	-
Дата изготовления	-
Объем партии	-
Тара, упаковка	Стеклянная посуда
НД на методику отбора	ГОСТ Р 51592-2000
Условия транспортировки	автотранспорт
Условия хранения	Проба в ИЛЦ не хранилась
Дополнительные сведения	В рамках проекта очистки воды
Лицо, ответственное за оформление данного протокола:	Пом. врача по общей гигиене отд. СГМ  Аллаярова А.Э. (подпись, Ф.И.О.)

Руководитель ИЛЦ

В.В.Ануфриева



Код пробы (образца): 1.13.1578.1.1				
Дата начала исследования: 24.06.2013, 12.30ч				
Дата окончания исследования: 26.06.2013, 15.00ч				
САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:				
Регистр. №	Определяемые показатели	Результаты исследований	Единицы измерения (для графы 3)	НД на методы исследований
1	2	3	4	5
412	Нефтепродукты	8,030 ± 2,007	мг/дм ³	ПНД Ф 14.1:2:4.128-98
НТД на подготовку пробы: соответствует НД на методы исследования				
Исследования проводили:				
Должность		Ф.И.О.		Подпись
химик-эксперт		Панюкова Н.А.		
Зав. СГЛ		Шкляева Н.В.		

Результаты исследований (испытаний) относятся только к объектам (образцам), прошедшим испытания.
 Протокол исследований (испытаний, измерений) не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения лаборатории.
 протокол № 1578 от « 28 » 06 2013 г. Общее количество страниц 2, страница 2

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека
 ФБУЗ «ЦЕНТР ГИГИЕНЫ И ЭПИДЕМИОЛОГИИ В РЕСПУБЛИКЕ КОМИ»
**ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
 «ЦЕНТР ГИГИЕНЫ И ЭПИДЕМИОЛОГИИ В РЕСПУБЛИКЕ КОМИ В ГОРОДЕ УХТЕ»**
 Свидетельство об аккредитации экспертной организации от 04.03.2010 № 70-АК, действительно до 04.03.2015,
 выдано Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека
АККРЕДИТОВАННЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ЦЕНТР

Юридический адрес:	167001, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Димитрова, д. 3/3	Аттестат аккредитации № ГСЭН.RU.ЦОА.004.01 от 23 января 2009 года Зарегистрирован в Едином реестре: № РОСС RU.0001.510872 от 23 января 2009 года Действителен до 23 января 2014 года
Адрес лаборатории:	169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Севастопольская, 1	
Тел./факс:	(8-8216) 75-09-83	
ОКПО 75775049, ОГРН 105110046114 ИНН 1101486406, КПП 110202001		

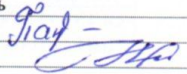
**ПРОТОКОЛ
 ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
 № 1579 от 28.06.2013**

Наименование пробы (образца)	Вода пластиковая (1 обработка)
Пробы (образцы) направлены (наименование, адрес, подразделение организации, направившей пробы)	Филиал ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Коми в городе Ухта», пом. врача по общей гигиене Аллаярова А.Э.
Дата отбора пробы (образца)	22.06.2013
Дата доставки пробы (образца)	24.06.2013 12 ч 00 мин.
Цель отбора	На содержание нефтепродуктов. По договору Ухт00032 от 14.06.2013
Юридическое лицо, индивидуальный предприниматель или физическое лицо, у которого отбирались пробы (образцы)	Физическое лицо Лютоев А.А., 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Юбилейная, д. 26, к. 257.
Объект, где производился отбор пробы (образца) (наименование, фактический адрес)	Нижнечучинское месторождение, пластиковая вода без обработки. Республика Коми.
Код пробы (образца)	1.13.1579.1.1.
Изготовитель (наименование, фактический адрес (страна, регион и т.д.))	-
Дата изготовления	-
Объем партии	-
Тара, упаковка	Стеклянная посуда
НД на методику отбора	ГОСТ Р 51592-2000
Условия транспортировки	автотранспорт
Условия хранения	Проба в ИЛЦ не хранилась
Дополнительные сведения	В рамках проекта очистки воды
Лицо, ответственное за оформление данного протокола:	Пом. врача по общей гигиене отд. СГМ Аллаярова А.Э. (подпись, Ф.И.О.)

Руководитель ИЛЦ



В.В.Ануфриева

Код пробы (образца): 1.13.1579.1.1				
Дата начала исследования: 24.06.2013, 12.30ч				
Дата окончания исследования: 26.06.2013, 15.00ч				
САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:				
Регистр. №	Определяемые показатели	Результаты исследований	Единицы измерения (для графы 3)	НД на методы исследований
1	2	3	4	5
413	Нефтепродукты	1,020 ± 0,260	мг/дм ³	ПНД Ф 14.1:2:4.128-98
НТД на подготовку пробы: соответствует НД на методы исследования				
Исследования проводили:				
Должность		Ф.И.О.		Подпись
химик-эксперт		Панюкова Н.А.		
Зав. СГЛ		Шкляева Н.В.		

Результаты исследований (испытаний) относятся только к объектам (образцам), прошедшим испытания.
 Протокол исследований (испытаний, измерений) не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения лаборатории.
 протокол № 1579 от « 28 » 06 2013 г. Общее количество страниц 1, страница 1

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека
 ФБУЗ «ЦЕНТР ГИГИЕНЫ И ЭПИДЕМИОЛОГИИ В РЕСПУБЛИКЕ КОМИ»
**ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
 «ЦЕНТР ГИГИЕНЫ И ЭПИДЕМИОЛОГИИ В РЕСПУБЛИКЕ КОМИ В ГОРОДЕ УХТЕ»**
 Свидетельство об аккредитации экспертной организации от 04.03.2010 № 70-АК, действительно до 04.03.2015,
 выдано Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека
АККРЕДИТОВАННЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ЦЕНТР

Юридический адрес:	167001, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Димитрова, д. 3/3	Аттестат аккредитации № ГСЭН.RU.Ц0А.004.01 от 23 января 2009 года Зарегистрирован в Едином реестре: № РОСС RU.0001.510872 от 23 января 2009 года Действителен до 23 января 2014 года
Адрес лаборатории:	169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Севастопольская, 1	
Тел./факс:	(8-8216) 75-09-83	
ОКПО 75775049, ОГРН 105110046114 ИНН 1101486406, КПП 110202001		

**ПРОТОКОЛ
 ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
 № 1580 от 28.06.2013**

Наименование пробы (образца)	Вода пластиковая (2 обработка)
Пробы (образцы) направлены (наименование, адрес, подразделение организации, направившей пробы)	Филиал ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Коми в городе Ухта», пом. врача по общей гигиене Аллаярова А.Э.
Дата отбора пробы (образца)	22.06.2013
Дата доставки пробы (образца)	24.06.2013 12 ч 00 мин.
Цель отбора	На содержание нефтепродуктов. По договору Ухт00032 от 14.06.2013
Юридическое лицо, индивидуальный предприниматель или физическое лицо, у которого отбирались пробы (образцы)	Физическое лицо Лютов А.А., 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Юбилейная, д. 26, к. 257.
Объект, где производился отбор пробы (образца) (наименование, фактический адрес)	Нижнечучинское месторождение, пластиковая вода без обработки. Республика Коми.
Код пробы (образца)	1.13.1580.1.1.
Изготовитель (наименование, фактический адрес (страна, регион и т.д.))	-
Дата изготовления	-
Объем партии	-
Тара, упаковка	Стеклопосуда
НД на методику отбора	ГОСТ Р 51592-2000
Условия транспортировки	автотранспорт
Условия хранения	Проба в ИЛЦ не хранилась
Дополнительные сведения	В рамках проекта очистки воды
Лицо, ответственное за оформление данного протокола:	Пом. врача по общей гигиене отд. СГМ _____ Аллаярова А.Э. (подпись, Ф.И.О.)

Руководитель ИЛЦ _____

В.В.Ануфриева



Код пробы (образца): 1.13.1580.1.1				
Дата начала исследования: 24.06.2013, 12.30ч				
Дата окончания исследования: 26.06.2013, 15.00ч				
САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:				
Регистр. №	Определяемые показатели	Результаты исследований	Единицы измерения (для графы 3)	НД на методы исследований
1	2	3	4	5
414	Нефтепродукты	1,250 ± 0,310	мг/дм ³	ПНД Ф 14.1:2:4.128-98
НТД на подготовку пробы: соответствует НД на методы исследования				
Исследования проводили:				
Должность		Ф.И.О.		Подпись
химик-эксперт		Панюкова Н.А.		<i>Гай</i>
Зав. СГЛ		Шкляева Н.В.		

Результаты исследований (испытаний) относятся только к объектам (образцам), прошедшим испытания.
 Протокол исследований (испытаний, измерений) не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения лаборатории.


протокол № 1580 от «28» 06 2013 г.

Общее количество страниц 2, страница 1

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека
 ФБУЗ «ЦЕНТР ГИГИЕНЫ И ЭПИДЕМИОЛОГИИ В РЕСПУБЛИКЕ КОМИ»
**ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
 «ЦЕНТР ГИГИЕНЫ И ЭПИДЕМИОЛОГИИ В РЕСПУБЛИКЕ КОМИ В ГОРОДЕ УХТЕ»**
 Свидетельство об аккредитации экспертной организации от 04.03.2010 № 70-АК, действительно до 04.03.2015,
 выдано Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека
АККРЕДИТОВАННЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ЦЕНТР

Юридический адрес:	167001, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Димитрова, д. 3/3	Аттестат аккредитации № ГСЭН.RU.Ц0А.004.01 от 23 января 2009 года Зарегистрирован в Едином реестре: № РОСС RU.0001.510872 от 23 января 2009 года Действителен до 23 января 2014 года
Адрес лаборатории:	169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Севастопольская, 1	
Тел./факс:	(8-8216) 75-09-83	
ОКПО 75775049, ОГРН 105110046114 ИНН 1101486406, КПП 110202001		

**ПРОТОКОЛ
 ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
 № 1581 от 28.06.2013**

Наименование пробы (образца)	Вода пластиковая (3 обработка)
Пробы (образцы) направлены (наименование, адрес, подразделение организации, направившей пробы)	Филиал ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Коми в городе Ухте», пом. врача по общей гигиене Аллаярова А.Э.
Дата отбора пробы (образца)	22.06.2013
Дата доставки пробы (образца)	24.06.2013 12 ч 00 мин.
Цель отбора	На содержание нефтепродуктов. По договору Ухт00032 от 14.06.2013
Юридическое лицо, индивидуальный предприниматель или физическое лицо, у которого отбирались пробы (образцы)	Физическое лицо Лютоев А.А., 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Юбилейная, д. 26, к. 257.
Объект, где производился отбор пробы (образца) (наименование, фактический адрес)	Нижнечучинское месторождение, пластиковая вода без обработки. Республика Коми.
Код пробы (образца)	1.13.1581.1.1.
Изготовитель (наименование, фактический адрес (страна, регион и т.д.))	-
Дата изготовления	-
Объем партии	-
Тара, упаковка	Стеклянная посуда
НД на методику отбора	ГОСТ Р 51592-2000
Условия транспортировки	автотранспорт
Условия хранения	Проба в ИЛЦ не хранилась
Дополнительные сведения	В рамках проекта очистки воды
Лицо, ответственное за оформление данного протокола:	Пом. врача по общей гигиене отд. СГМ  Аллаярова А.Э. (подпись, Ф.И.О.)

Руководитель ИЛЦ



МП.

В.В.Ануфриева

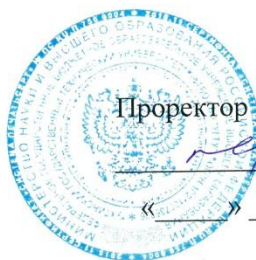
Код пробы (образца): 1.13.1581.1.1				
Дата начала исследования: 24.06.2013, 12.30ч				
Дата окончания исследования: 26.06.2013, 15.00ч				
САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:				
Регистр. №	Определяемые показатели	Результаты исследований	Единицы измерения (для графы 3)	НД на методы исследований
1	2	3	4	5
415	Нефтепродукты	2,030 ± 0,507	мг/дм ³	ПНД Ф 14.1:2.4.128-98
НТД на подготовку пробы: соответствует НД на методы исследования				
Исследования проводили:				
Должность		Ф.И.О.	Подпись	
химик-эксперт		Панюкова Н.А.		
Зав. СГЛ		Шкляева Н.В.		

Результаты исследований (испытаний) относятся только к объектам (образцам), прошедшим испытания.
 Протокол исследований (испытаний, измерений) не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения лаборатории.

протокол № 1581 от «28» 06 2013 г.

Общее количество страниц 2, страница 2

Приложение 4.



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе УГТУ

Дубиковский С. Ю.

« _____ » _____ 2019

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс

Лютоева Александра Анатольевича

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы Лютоева Александра Анатольевича «Высокоградиентный магнитный сепаратор для очистки пластовых вод от нефтезагрязнений с использованием нанодисперсного магнетита» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль) внедрены в учебный процесс в рамках дисциплин «Математическое моделирование при проектировании машины и оборудования» при подготовке бакалавров по направлению 15.02.03 и «Системный анализ нефтяных и газовых промыслов» при подготовке магистров по направлению 15.04.02 на кафедре МОНиГП.

Разработки по объекту внедрения включены лекционные, лабораторные и практические занятия. Основные материалы для лабораторных и практических работ изложены в практикуме «Расчет конструкции магнитных устройств», включающий в себя различные методы решения полевых задач по магнитостатике и электростатике, а также приведена методика по проектированию и расчету режима работы магнитного устройства.

Заведующий кафедрой МОНиГП

Д. А. Борейко

Научный руководитель,

профессор кафедры МОНиГП

И. Ю. Быков

Приложение 5.



ООО «НИПИ нефти и газа УГТУ»

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «НИПИ нефти и газа УГТУ»

Г. Г. Грибов.

« _____ » _____ 2019




МЕТОДИКА

расчета режима работы магнитного сепаратора НМС-1 для извлечения из воды эмульгированных нефтепродуктов с применением нанодисперсного магнетита

РАЗРАБОТАНО:

Руководитель
Д-р техн. наук, профессор

 Быков И. Ю.
« 22 » 03 _____ 2019

Исполнитель
Старший преподаватель кафедры ВМ

 Лютоев А. А.
« 22 » марта _____ 2019

Ухта, 2019