

На правах рукописи



ЛЮТОЕВ 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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Ухта 2020

Диссертация выполнена в
Ухтинском государственном техническом университете на кафедре
«Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заслуженный
работник Республики Коми,
Быков Игорь Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент, зам. генерального
директора – генеральный конструктор ООО
"Технологии и системы водоочистки",
Бульжев Евгений Михайлович

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Машиноведения» ФГБОУ ВО «Казанский
национальный исследовательский технологический
университет»,
Каратаев Оскар Робиндарович

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет», г. Уфа.

Защита диссертации состоится «5» сентября 2020 г. в 14⁰⁰ часов на
заседании диссертационного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном
техническом университете по адресу: 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул.
Первомайская, д. 13.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ
ВО «Ухтинский государственный технический университет», а так же на сайте
вуза по адресу www.ugtu.net в разделе «Наука → Диссертации».

Автореферат разослан «28» июля 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Д. А. Борейко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

При нефтедобыче пластовые воды, отделяемые от нефти в процессе ее сбора и подготовки, называемые 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, определяются видом коллектора (его проницаемостью и пористостью) и для некоторых видов достигают значений меньше 5 мг/дм³ (отраслевой стандарт ОСТ 39-225-88).

Среди современных методов очистки воды от нефтепродуктов можно выделить следующие: 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, исследования в области разработки эффективных устройств очистки эмульгированных вод от нефтепродуктов является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

В России исследованиями очистки нефтесодержащих вод ферромагнитными сорбентами занимались В. И. Филиппов, Д. Ю. Блохин, В. М. Бачурихин, А. В. Демин, Ю. А. Миргород. Сорбенты предназначены для удаления неэмульгированной и грубоэмульгированной нефти с поверхности воды. Технические характеристики устройства для захвата омагниченной нефти в работах не представлены.

В зарубежных работах А. Р. Sullivan показано, что твердые частицы размерами меньше микрона обладают повышенной поверхностной активностью на границе нефти и воды. R. R. Oder представил результаты лабораторных испытаний по обезвоживанию калифорнийской сырой нефти путем приготовления эмульсий соединениями железа.

Среди наиболее распространенных магнитных сепараторов можно выделить кассетно-патронный, валковый, электромагнитный, роторный. Среди них кассетно-патронный наиболее часто применяемый магнитный сепаратор для очистки жидкостей. Существенный вклад в изучении и проектировании таких устройств внесли Булыжёв Е. М., Булыжёв Э. Е. Афанасьев Е. П., Меньшов Е. Н., Кондратьева Н. Н.

Рабочие элементы кассетно-патронных магнитных сепараторов имеют форму цилиндров и стержней. В поперечном направлении им протекает очищаемая жидкость. Для повышения эффективности очистки от ферромагнитных частиц традиционно пытаются увеличить градиент и индукцию магнитного поля путем модернизации рабочей зоны и изменения конфигурации магнитного поля. Предлагаемые устройства магнитных сепараторов приспособлены к конкретным условиям эксплуатации и способны экстрагировать ферромагнитные частицы с определенным магнитным моментом. Нанодисперсный магнетит создает небольшую объемную долю ферромагнитного материала на поверхности глобулы нефти, поэтому для ее извлечения требуется высокоэнергетичная магнитная система, с удовлетворяющими таким требованиям значениями параметров градиента и индукции магнитного поля.

Таким образом, существует необходимость разработки магнитного сепаратора, имеющего возможность экстракции из пластовой воды глобул нефти, покрытой слоем магнитных наночастиц.

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.

Теоретически обосновано продольное расположение стержней в высокоградиентном магнитном сепараторе относительно жидкостного потока. Разработан алгоритм 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 (П. 1).

2. Теоретические и экспериментальные исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций (П. 3).

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач применялись методы системного анализа, на основе которого выполнена декомпозиция с выделением основных параметров управления процессом очистки. Использовались процедуры моделирования и эксперимента. Для описания основных свойств объекта исследования применялось математическое моделирование, при котором процессы описаны аналитическими выражениями, для реализации которых использовались программные продукты Matcad и Matlab. Для численной оценки и решения задач конструирования элементов магнитного сепаратора использовалось компьютерное моделирование в программе инженерного анализа и двумерного моделирования Elcut. Экспериментальное исследование проводилось на разработанном лабораторном стенде для проверки адекватности составленных моделей и 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 значение 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: Международной молодежной научной конференции “Севергеоэкотех”, Ухта: УГТУ, 2011, 2012; Научно-технических конференциях преподавателей и сотрудников, Ухта : УГТУ, 2011-2015; 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; Республиканском молодежном инновационном конвенте «Молодежь – будущему Республики коми», Ухта, 2011-2013; Республиканском молодежном инновационном форуме «Инноватика: Крохаль 2012», Ухта, 2012; Научно-технической конференции «Проблемы разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов», Ухта, 2012-2019; II Всероссийской научной конференции «Молодежь и наука на Севере», 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, 2013-2020; Международном семинаре «Физико-математическое моделирование систем», Воронеж, ВГТУ, 2013-2019.

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 высокоградиентного магнитного сепаратора, его расчет для установления режима работы, проведение физических экспериментов, участие в создании методики разработки и режима работы магнитного сепаратора.

Публикации

Основные результаты исследований опубликованы в 23 работах, из них 11 статей в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК Минобрнауки России, 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.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Изложены используемые методы и краткое содержание проведенных исследований. Представлены сведения о публикациях и апробации результатов работы.

В первой главе «Анализ методологических подходов применения магнитных сепараторов для очистки пластовых вод от нефти магнитными сорбентами» выполнен обзор работ о состоянии пластовых водных систем на нефтедобыче, анализ современных способов очистки пластовых вод от нефти, в том числе с применением ферромагнитных сорбентов и магнитных сепараторов.

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. Большинство Тимано-Печорских месторождений характеризуется сложным геологическим строением с тектоническими разрушениями и зачастую низкопроницаемыми коллекторами. Например, Печоро-Колвинский вал имеет среднюю продуктивность НГК с проницаемостью 0,5-0,9 мкм². Для таких коллекторов требование остаточного содержания нефтепродуктов по ОСТ 39-225-88 составляет до 40-50 мг/л. При этом для нижедевонских отложений проницаемость может иметь значения всего 0,0005-0,0095 мкм², поэтому для такого коллектора массовая доля нефтепродуктов в пластовой воде должна быть менее 5 мг/л. При этом паспортный норматив к остаточному содержанию нефтепродуктов на выходе резервуаров-отстойников РВС составляет 50 мг/л, что неприемлемо для рассматриваемых условий. Кроме того, представленные данные на примере Возейского месторождения показывают, что остаточное содержание нефтепродуктов на выходе РВС может в несколько превышать установленные нормы паспорта и глобулы нефти радиусом от 5 до 25 мкм после отстаивания остаются в воде. В связи с этим возникает необходимость дополнительной очистки пластовой воды от эмульгированных нефтепродуктов.

Разработкой различных модификаций ферромагнитных сорбентов для сбора нефтепродуктов с поверхности воды занимались В. И. Филиппов, А. М. Тишин, Д.

Ю. Блохин, В. М. Макаров, Г. Я. Жигалин, А. Л. Бачурихин, А. В. Демин, Ю. А. Миргород, В. В. Шайдаков и др. Из анализа следует, что сухие ферромагнитные порошки со специальными гидрофобизированными поверхностями, и магнитные жидкости предназначены для сбора нефтепродуктов с поверхности сточных вод, при этом совершенствование сорбентов происходит за счет уменьшения доли водопоглощения, путем модификации поверхности сорбента. В работах Oder R. показано, что твердые частицы размерами меньше микрона обладают повышенной поверхностной активностью на границе нефти и воды. Таким образом, использование нанодисперсного магнетита (1-100 нм) для очистки воды от эмульсий нефти является перспективным направлением в силу того, что такие частицы не надо гидрофобизировать. За счет большой поверхностной энергии и своего малого размера, частицы собираются на границе фаз нефти и воды.

Среди наиболее распространенных магнитных сепараторов можно выделить валковый, электромагнитный, роторный. Среди них кассетно-патронный магнитный сепаратор наиболее часто применяется для очистки жидкостей. Существенный вклад в изучении и проектировании таких устройств внесли Булыжёв Е. М., Булыжёв Э. Е., Афанасьев Е. П., Меньшов Е. Н., Кондратьева Н. Н.

Рабочие элементы кассетно-патронных магнитных сепараторов имеют форму цилиндров и стержней, в поперечном направлении которым протекает очищаемая жидкость. Для повышения эффективности очистки от ферромагнитных частиц традиционно пытаются увеличить градиент и индукцию магнитного поля, путем модернизации рабочей зоны и изменения конфигурации магнитного поля. В то же время важными параметрами являются дальность извлечения ферромагнитной частицы и длительность нахождения частицы в рабочей зоне сепаратора, работающего в динамическом режиме. Каждый такой сепаратор предназначен для конкретных условий и способен извлекать из воды магнитные частицы с определенным магнитным моментом.

Анализ работы существующих магнитных сепараторов показал практическую потребность в разработке конструкции жидкостного магнитного сепаратора с технической возможностью эксплуатации в промышленных условиях и основанного на принципах создания постоянной высокоэнергетичной магнитной системы способной захватить омагниченные нанодисперсным магнетитом нефтяные частицы с магнитным моментом менее 10^{-14} Ам².

Наночастицы оксидов железа применялись для стабилизации эмульсий нефти и для обезвоживания Калифорнийской нефти. Таким образом, основываясь на зарубежном опыте применения наночастиц, сформулирована идея по очистке пластовой воды от эмульгированных нефтяных частиц с применением нанодисперсного магнетита и высокоградиентного магнитного сепаратора.

Во второй главе «Комплекс методик для проведения исследований» сформирован и обоснован комплекс методик для подготовки и проведения физических испытаний и теоретических расчетов при проектировании устройства магнитного сепаратора.

Сформированный научно-методический комплекс включает методику сбора, хранения проб воды, содержащей нефтепродукты, в соответствии с ГОСТ 31953-

2012; метод определения нефтепродуктов в природных и сточных водах, изложенных в государственном стандарте ГОСТ 17.1.4.01-80; флуориметрический метод контроля содержания нефтепродуктов в воде; методику определения индукции и градиента магнитного поля, основанную на аналитической обработке результатов измерений цифровым гауссметром и численных методах решения полевых задач, с целью определения наиболее оптимальной конфигурации магнитных полей при проектировании магнитного сепаратора; методику определения размеров частиц, основанную на интерполяции данных, полученных оптической микроскопией; методику для определения концентраций твердых частиц в соответствии с ГОСТ 27026-86; методику получения нанодисперсного магнетита Fe_3O_4 по реакции Массарта, позволяющий получить частицы магнетита размерами 5-10 нм, методику оценки эффективности работы магнитного сепаратора, включающую основные критерии оценивания.

В третьей главе «Моделирование работы высокоградиентного магнитного сепаратора с применением нанодисперсного магнетита» выполнен комплекс моделирования работы устройства магнитного сепаратора, имеющего высокоэнергетичную магнитную систему на постоянных редкоземельных магнитах NdFeB, 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.

На первом этапе проведено моделирование физических процессов в коллоидной системе магнитных наночастиц магнетита, основанных на известных законах. Для магнетита седиментационная устойчивость наблюдается у частиц меньше 7 мкм. Сравнив энергию разупорядочивающего теплового движения при 20^0 C , $k_b T = 4.14 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$ и по закону Хьюго Гамакера энергию межчастичного взаимодействия $E_v = 15 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$ без магнитных сил для коллоидного магнетита с размером частиц 10 нм без добавок ПАВ, можно сделать вывод, что частицы будут образовывать структурные агрегаты. Частицы, сорбируясь на поверхности эмульсии, могут образовать, как монослой, так и формировать разные структурные агрегаты, в которой участвуют так же и межфазовые слои. При этом магнитные силы не учитывались, поскольку частицы обладают суперпарамагнитными свойствами и характеризуются отсутствием остаточного магнитного поля. Моделирование по закону П. Ланжевена показывает, что частицы магнитно насыщаются в поле напряженностью 80 - 100 кА/м.

На втором этапе на основе моделирования проводится оценка возможности извлечения омагниченной эмульсионной глобулы нефти в поле неодимового магнита. Выведена формула для определения скорости движения омагниченной нанодисперсным магнетитом с магнитной насыщенностью $M_{нас}$ и диаметрами частиц d_c эмульсионной капли нефти $d_{эм}$ в неоднородном магнитном поле:

$$v = \frac{4kd_{эм}d_c M_{нас} L(z_q)}{18\eta} \left| \frac{dB}{dx} \right|, \quad (1)$$

где k – коэффициент упаковки магнитных частиц на поверхности эмульсии нефти, $L(z_c)$ – функция Ланжевена для намагничивания суперпарамагнитных частиц.

Первичная оценка возможности извлечения эмульсионной капли в поле магнита кубической формы NdFeB размером 25 мм по выведенному аналитическому выражению:

$$v = \frac{4kd_{эм}d_{ч}M_{нас}L(z_c)}{18\eta} 61.61 \cdot e^{-113.3x}, \quad (2)$$

показала, что на расстоянии менее 20 – 25 мм, наночастицы магнетита становятся магнитно насыщенными (рисунок 1), а, следовательно, получают движение в неоднородном магнитном поле. При этом невысокая скорость экстракции эмульсии размером от 5 до 20 мкм (таблица 1) говорит о том, что необходимо увеличивать градиент магнитного поля и сократить расстояние до захвата.

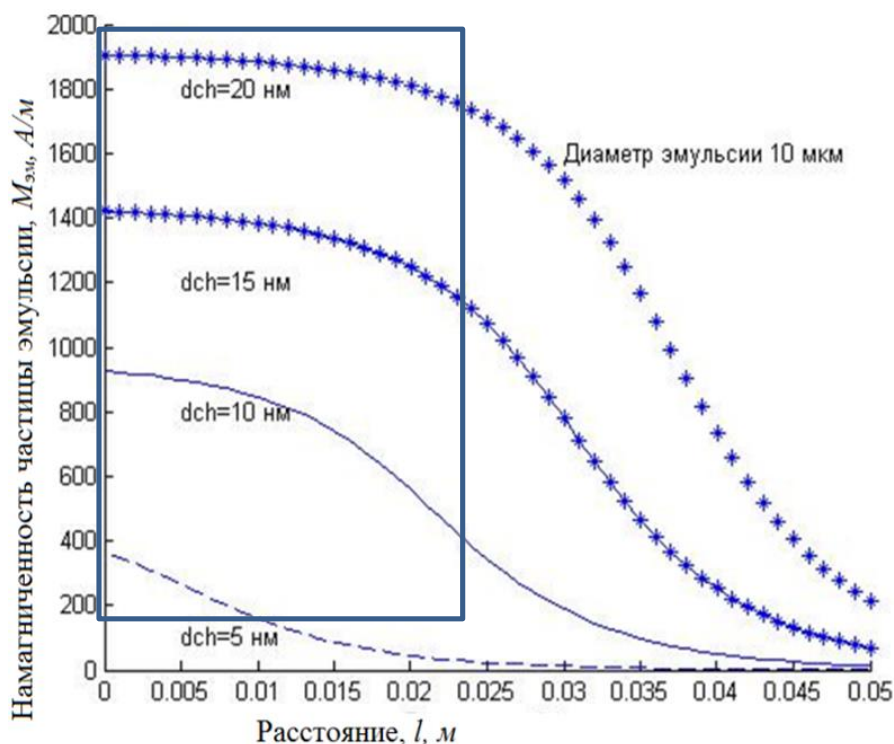


Рисунок 1 – Зависимость намагниченности капли нефти диаметром 10 мкм покрытой монослоем магнитных наночастиц диаметром d_{ch} от расстояния до полюса магнитного куба NdFeB (25 мм)

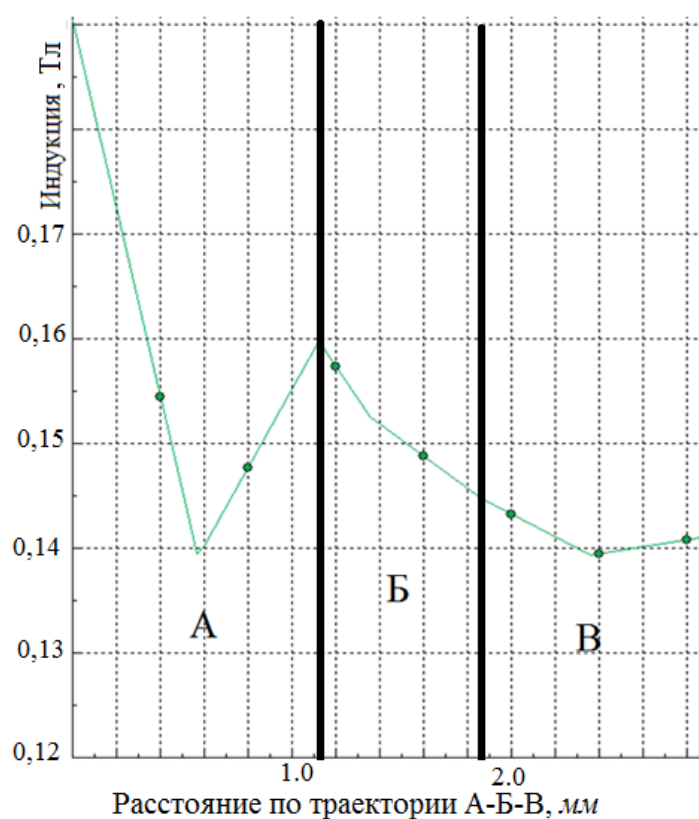
Таблица 1 – Расчет скорости капли $d_{ч}=10$ нм в поле магнита NdFeB.

Диаметр капли нефти $d_{эм}$ (мкм)	5	10	15	20
Средняя скорость эмульсии (мм/мин) на участке (0,2) см	0.19	0.38	0.57	0.76
Время осаждения (мин) на участке (0,2) см	104.3	52.1	34.7	26.1

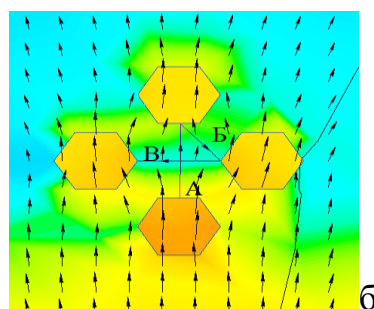
На третьем этапе в программе ELCUT 6.0 расчеты проводились с применением двумерного моделирования магнитных полей (плоскопараллельное решение задач) с целью определения оптимального магнитного поля в устройстве.

Для увеличения градиента магнитного поля было принято решение вооружить рабочую область магнитов стальными ферромагнитными стержнями, что способствует так же увеличению индукции магнитного поля. Среди рассмотренных вариантов расположения стержней было выбрано ромбовое

расположение по отношению к силовым линиям магнитного поля с толщиной 1 мм. В рабочей зоне между стержнями с таким расположением наблюдается индукция выше 0,12 Тл (поле в котором наблюдается насыщение магнетита) и средний линейный градиент 60-70 Тл/м.



а



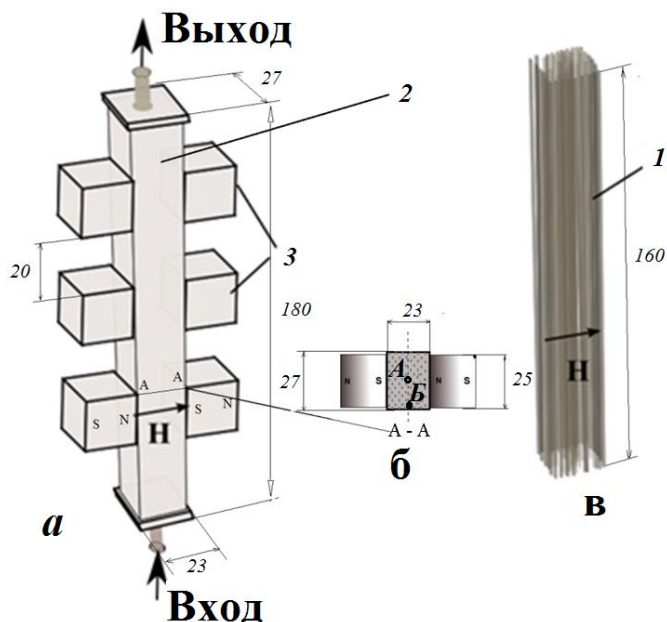
б

А – траектория от нижнего до верхнего стержня; Б – от верхнего до правого; В – от правого до левого
Рисунок 2 – Магнитное поле стержней в поперечном сечении диаметром 1 мм расположения типа ромб в поле 0,12 Тл (расстояние между стержнями 1 мм): а – график индукции магнитного поля по траекториям; а – визуализация модели магнитного поля

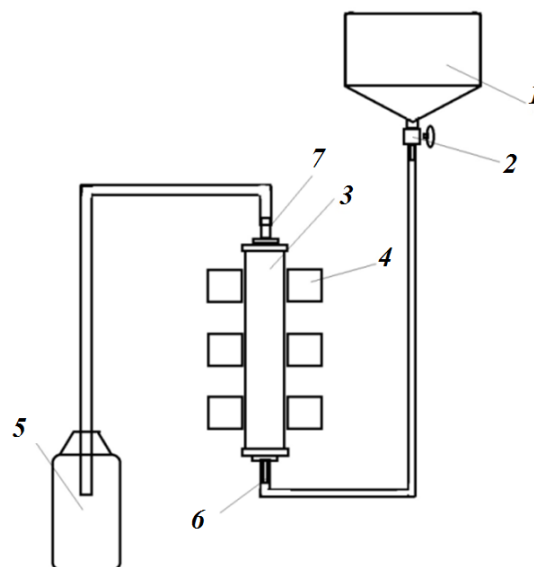
Распространение полей индукции неодимового магнита имеет форму окружности, поэтому для наиболее рационального использования ресурса магнита следует располагать его в центре сепаратора. Магнитный куб NdFeB размерами 25 мм способны намагничивать эмульсию до насыщения на расстоянии до 25 мм.

Четвертая глава «Экспериментальные исследования эффективности высокоградиентного магнитного сепаратора для очистки пластовой воды от нефтезагрязнений» посвящена разработке лабораторного стенда и экспериментальным исследованиям по изучению процессов экстракции эмульгированных нефтепродуктов из сточных вод с применением наночастиц магнетита и разработанного устройства.

На основе моделирования, выполненного в главе 3, предлагается экспериментальный образец магнитного сепаратора (рисунок 3) с продольным расположением стержней в картридже относительно потока, имеющих ромбовидную геометрию расположения по отношению к силовым линиям магнитного поля, предназначенный для очистки пластовой воды от эмульгированных нефтепродуктов. Стержни толщиной 1 мм были изготовлены из стали 2312. Схематичная установка стенда изображена на рисунке 4.



1 – стержни картриджа, 2 – корпус сепаратора, 3 – неодимовые магниты
Рисунок 3 – Лабораторная установка магнитного сепаратора: а – общий вид, б – вид в поперечном сечении А - А, в – картридж



1 – емкость, 2 - отводящий патрубок с краном, 3 – магнитный сепаратор, 4 – магнит NdFeB, 5 – емкость очищенной жидкости, 6 – патрубок входа, 7 – патрубок выхода

Рисунок 4 – Лабораторный стенд

Для изготовленного магнитного сепаратора магнитная индукция измерялась в различных точках, минимальная индукция наблюдалась в точке **Б** (рисунок 3, б), которая была принята в качестве установочной для расчета минимально необходимой скорости потока жидкости в сепараторе.

Путем аппроксимации градиента магнитного поля dB/dx по данным и воспользовавшись формулой 1 определена оптимальная скорость потока в сепараторе (таблица 2).

Таблица 2 - Результаты математического моделирования в точке **Б** ($d_{ch}= 10$ нм)

Диаметр частиц 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 в сепараторе, м/ч	60	120	300	428	545

Исходя из результатов, теоретически доказана возможность применения предложенной конструкции. Испытания проводились на образцах пластовых вод Ярегского, Нижнечутинского и Усинского месторождений. Скорость пропускания во всех опытах была установлена ≈ 60 м/ч.

С применением нанодисперсного магнетита остаточное содержание нефтепродуктов в воде удалось снизить до 80 % - 95 %. При одинаковых условиях нанодисперсный магнетит показал эффективность очистки на 20 % выше по сравнению с сухим магнетитовым порошком со средним размером гранул 1,9 мкм.

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 сцепные свойства в пограничном слое.

Резюмируя, 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.

В формуле 1 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 , так как результаты экспериментов с пластовой водой разных месторождений показали кратные различия по концентрациям магнетита. Таким образом, оптимальная концентрация магнитных наночастиц магнетита устанавливается по критериям качества очистки F_1 и скорости очистки с учетом экономической целесообразности F_2 :

$$F = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 \rightarrow \max \quad . \quad (3)$$

Для этого на первом этапе необходимо провести первичные испытания нанодисперсного магнетита для оценки эффективности очистки по критерию F_1 и определения сорбционной способности применяемого магнетита к конкретной пластовой воде.

Оценка по критерию F_2 скорости очистки с учетом экономической целесообразности определяется с учетом теоретически необходимой концентрацией магнитных частиц, чтобы не использовать их излишнее количество. Иначе говоря, оптимизируем коэффициент упаковки $k(C, P)$ при оптимальных концентрациях. Получена формула определения теоретически оптимальной концентрации коллоидного магнетита для случая образования монослоя на поверхности глобулы нефти:

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

На втором этапе, имея сведения о свойствах пластовой воды (плотности нефти $\rho_{\text{неф}}$, концентрации нефти $C_{\text{неф}}$, среднем размере глобул нефти $d_{\text{эм.к}}$) и первичных испытаниях, с помощью алгоритма (рисунки 5) определяем

оптимальную концентрацию нанодисперсного магнетита для каждой монодисперсной системы магнитных частиц.

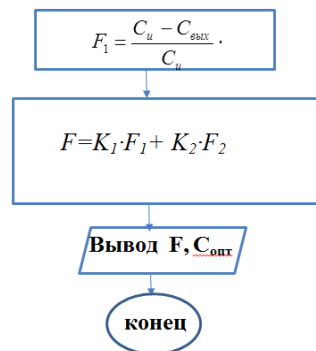
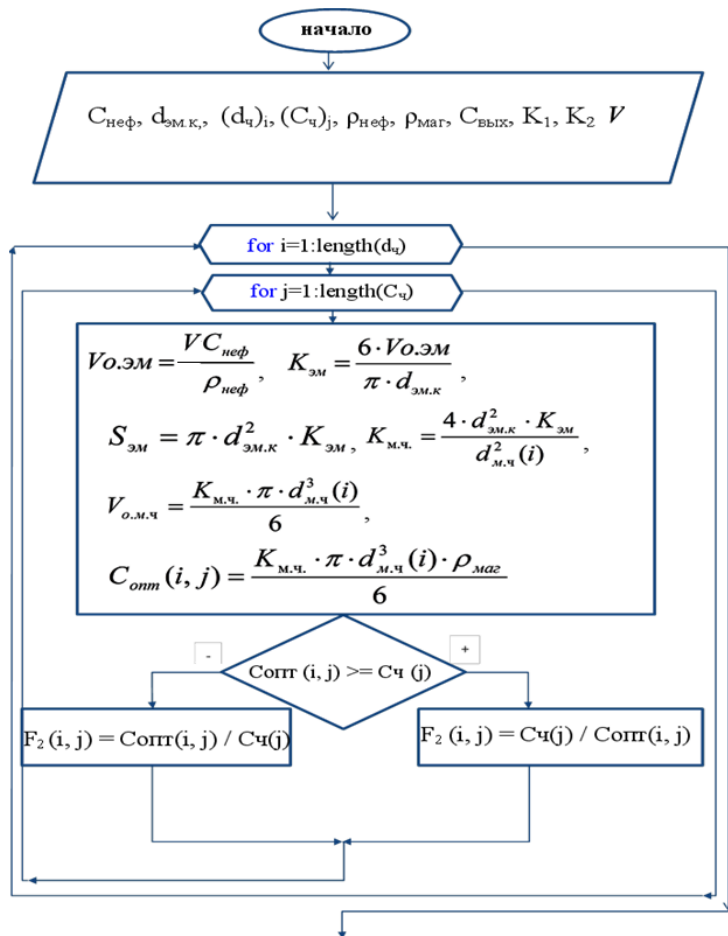


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма оценки оптимальной концентрации нанодисперсного магнетита

Применив в качестве начальных данных сведения об испытаниях на Нижнечутинском месторождении и реализовав настоящий алгоритм в пакете Matlab, были получены следующие результаты. Например, нанодисперсного магнетита требуется менее 0,1 кг/м³ для получения 70 % эффективности по выбранным критериям с равными весами (рисунок 6).

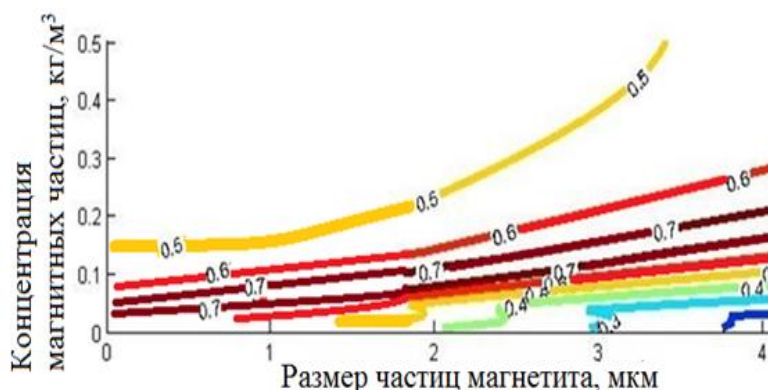
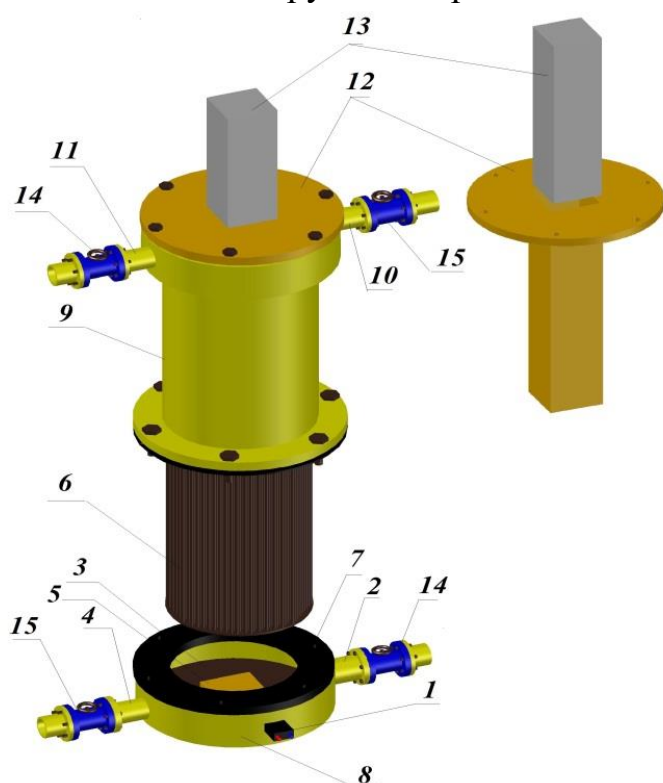


Рисунок 6 – Оценка эффективности очистки по заданным критериям с применением различных весов ($K_1 = 0,5$ – вес степени очистки, $K_2 = 0,5$ – вес скорости очистки за счет выбора оптимальных концентраций магнитных частиц)

Пятая глава «Методика обоснования конструкции и режимов работы высокоградиентного магнитного сепаратора с использованием нанодисперсного магнетита» посвящена проектированию конструкции магнитных сепараторов с продольным расположением стержней относительно потока для очистки пластовой воды от эмульгированной нефти с применением нанодисперсных частиц магнетита.

На рисунке 7 показано устройство высокоградиентного магнитного сепаратора. Изготовленный из немагнитного пластика цилиндрический корпус 9, оснащен сверху съемной крышкой 12 с кассетой для магнитного сердечника, а снизу днищем 8, который содержит патрубок входа очищаемой жидкости и патрубок входа промывочной жидкости с клапанами 15 и 14. Внутри основного корпуса установлен ферромагнитный картридж 6 цилиндрической формы из тонких и круглых стальных стержней, закрепленных в торцевых основаниях, наружный ряд стержней собран в виде «беличьего колеса», а внутренний ряд сформирован в виде сквозного отверстия квадратной формы для соосного размещения кассеты. В центре кассеты располагается в виде сердечника неодимовый параллелепипед квадратного сечения, стержни картриджа размещены внутри ромбовидно из условия, что векторы напряженности магнитного поля направлены по диагонали ромба. Для промывки устройство вооружено дополнительно патрубками промывки 14 и тепловым электронагревателем (ТЭН).

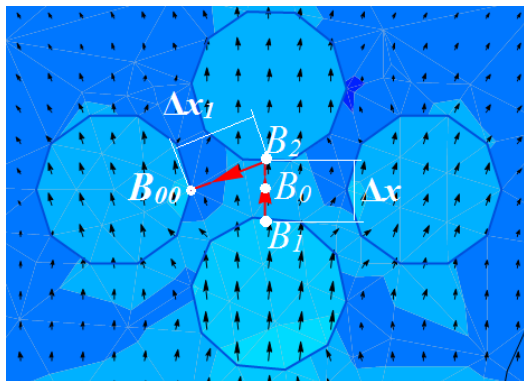


1 – Штекер подключения ТЭН-а, 2 – патрубок входа для промывки и добавления ПАВ, 3 – ТЭН, 4 – патрубок входа очищаемой жидкости, 5 – направляющая картриджа, 6 – ферромагнитный картридж, 7 – герметичный уплотнитель, 8 – днище корпуса, 9 – основной корпус, 10 – патрубок выхода во время промывки, 11 – патрубок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

Рисунок 7 – Магнитный сепаратор с ферромагнитным картриджем

На основе компьютерного и численного моделирования установлено, что радиус действия магнитов NdFeB (индукция магнитного поля выше 0,12 Тл) можно считать равным размеру соответствующего магнита, поэтому диаметр магнитного сепаратора в поперечном сечении выбираем из выражения $D=3a$, где a – сторона неодимового магнита. На рисунке 8 представлена схема оценки среднего градиента магнитного поля в рабочей области между стержнями, равная усредненному линейному градиенту магнитного поля в окрестностях трех точек контакта диагональных и соседних стержней в ромбовидной рабочей области:

$$\left| \frac{dB}{dx} \right| = \left| \frac{B_1 + B_2 - 2B_0}{2\Delta x} \right| + \left| \frac{B_2 - B_{00}}{2\Delta x_1} \right|, \quad (5)$$



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.

Рисунок 8 – Схема оценки градиента магнитного поля в рабочей области картриджа.

На рисунке 10 представлены графики магнитной индукции в окрестностях трех точек контакта на поверхности стержней толщиной 1 мм (рисунок 9,а) и 2 мм (рисунок 9,б).

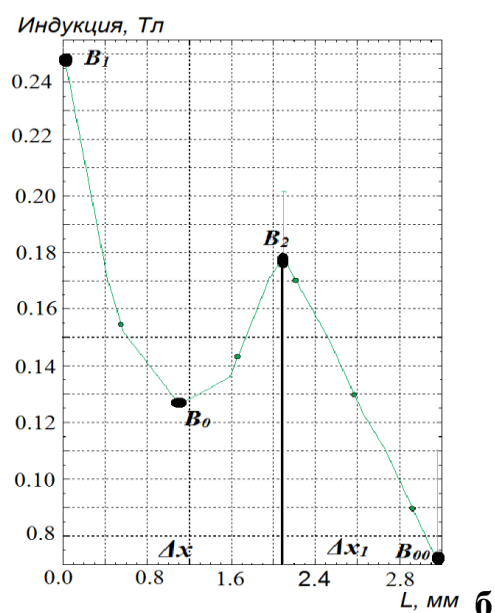
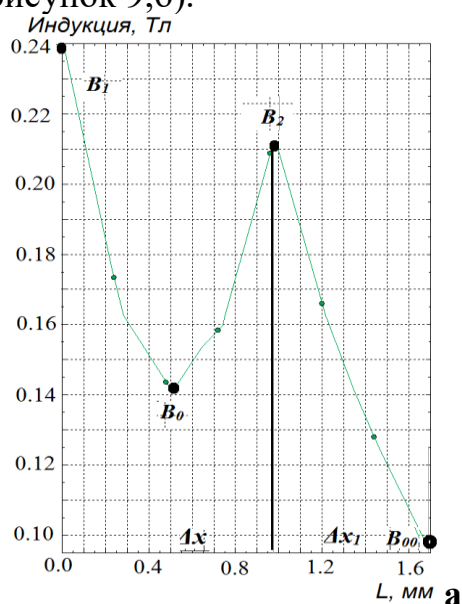


Рисунок 9 – Индукция между стальными стержнями ферромагнитного картриджа: а – диаметр 1 мм, расстояние 1 мм (0,12 Тл), б – диаметр 2 мм, расстояние 2 мм (0,12 Тл)

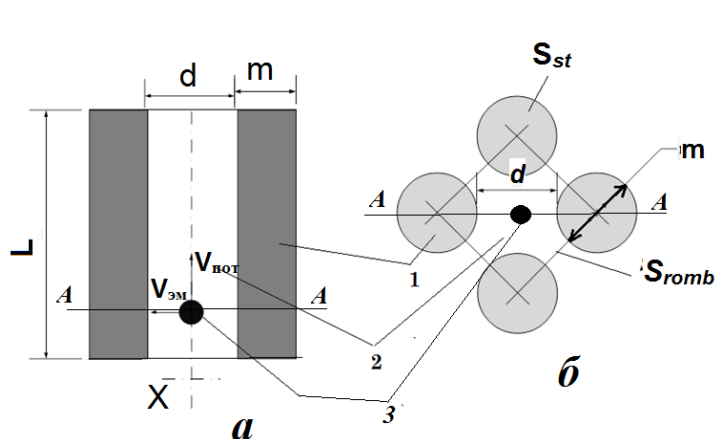
В таблице 3 представлены результаты расчета градиента магнитного поля по построенным моделям. Видно, чем тоньше стержень, тем больше градиент магнитного поля.

Таблица 3 – Градиент магнитного поля между 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	30	42	76	176

Таким образом, ферромагнитный картридж рекомендуется изготавливать из стержней толщиной 1 мм и располагать так же на расстоянии 1 мм друг от друга. Увеличение диаметра стержней будет приводить к уменьшению градиента

магнитного поля и коэффициента рабочей площади устройства, поэтому производительность будет снижаться.



1 – ферромагнитные стержни, 2 – рабочая зона между стержнями, 3 – омагниченная капля эмульсии нефти
Рисунок 10 – Модель извлечения омагниченной нефтяной капли в магнитном сепараторе с продольным расположением стержней относительно потока: а) модель движения капли в магнитном поле, б) поперечное сечение A – A рабочей зоны магнитного сепаратора

Исходя из модели на рисунке 10, определен механизм режима работы магнитного сепаратора с продольным расположением стержней длиной L относительно потока, производительность которого оценивается выражением:

$$Q = \frac{4S_r L k d_{эм} d_{ч} M_{нас} L(z_{ч})}{9\eta d} \left| \frac{dB}{dx} \right|, \quad (6)$$

здесь рабочая площадь S_r вычисляется по следующей формуле:

$$S_r = \frac{(m+d) - \pi m/4}{(m+d)} \left(\frac{\pi D^2}{4} - a^2 \right), \quad (7)$$

где D – диаметр рабочей зоны сепаратора.

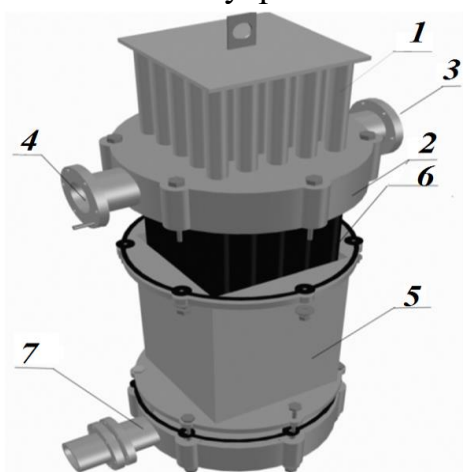
Результаты расчетов представлены в таблице 4 со следующими размерами: длина ферромагнитного стержня в картридже $L=0.5$ м, диаметр внутренней части основного корпуса магнитного сепаратора в поперечном сечении $D=0.3$ м, неодимовый магнитный сердечник со стороной $a=0,1$ м. Размеры частиц магнетита $d_{ч} = 10^{-8}$ м, размер капель эмульсии $d_{эм} = 10^{-6}$ м, коэффициент упаковки магнитных наночастиц $k=0.5$.

Таблица 4 – Результаты расчета производительности сепаратора $D=0.3$ м.

Диаметр стержня 10^{-3} , м	Расстояние между стержнями 10^{-3} , м	Усредненный градиент магнитного поля, Тл/м	Скорость потока в магнитном сепараторе, м/с	Производительность сепаратора, м ³ /ч
1	1	176	0,1	13,9
2	1	87	0,05	5,4

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 облегчения обслуживания магнитного сепаратора и увеличения градиента магнитного поля в процессе непрерывной эксплуатации, предлагается устройство магнитного сепарирования кассетно патронного типа (рисунок 11). Предлагается

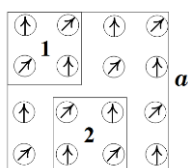
вместо магнитного сердечника и ферромагнитного картриджа использовать магнитную кассету 1, состоящую из круглых стержней магнитов NdFeB расположенных внутри немагнитных чехлов б.



1 – подвижная кассета, 2 – немагнитный корпус, 3, 4 – отверстие для выхода очищенной воды и выхода в режиме промывки кассетных чехлов, 5 – основная часть корпуса, 6 – кассетный чехол, 7 – входное отверстие

Рисунок 11 – Кассетно-патронный магнитный сепаратор

На основе построенных моделей и расчетов было определено, для магнитной кассеты устройства оптимальным расположением полюсов стержней NdFeB является 90° и 45° диагональных вершин при квадратном расположении (рисунок 12). Диаметр стержня и диагональное расстояние между ними не более 5 мм.



1 – Сектор 1, 2 – Сектор 2

Рисунок 12 – Схема расположения стержней в кассете

На рисунке 13 представлена модель магнитного поля секторов 1 и 2. При таком расположении стержней наблюдается магнитное поле больше 0,12 Тл, и сильным градиентом.

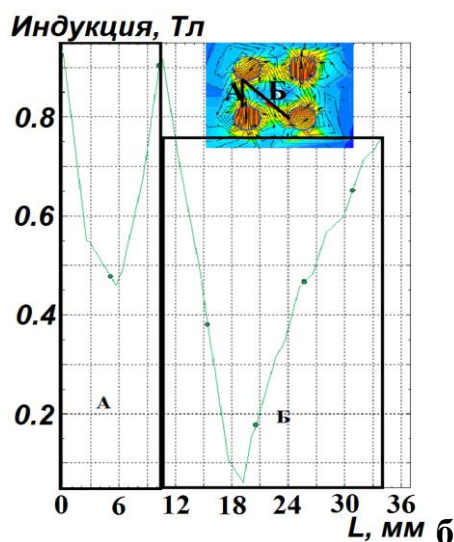
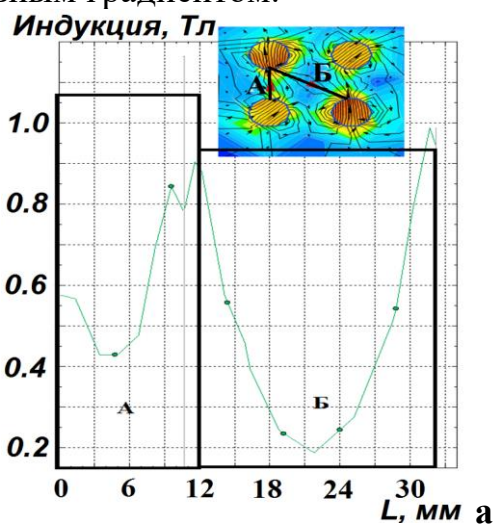


Рисунок 13 – Расчет магнитного поля для стержней толщиной 10 мм

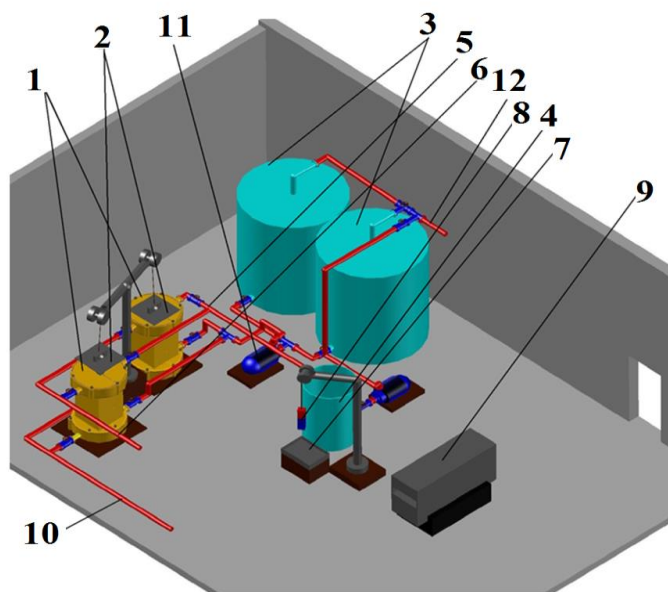
Результаты расчета производительности кассетного магнитного сепаратора при условии $a = 0,25$ м; $L = 0,5$ м; $d_{ч} = 10^{-8}$ м, $d_{эм} = 10^{-6}$ м представлены в таблице 5. При толщине стержня 5 мм наблюдается существенный рост градиента и производительности.

Таблица 5 – Производительность кассетного сепаратора при $a = 0,25$ м.

Толщина стержня NdFeB · 10 ⁻³ , м	Расстояние между стержнями · 10 ⁻³ , м	Усредненный градиент магнитного поля, dB/dx , Тл/м	Скорость потока в магнитном сепараторе v , м/с	Производительность сепаратора Q , м ³ /ч
1	1	580	0,35	47,3
3	3	580	0,11	15,8
5	5	560	0,062	9,6
10	10	240	0,014	2,2

Резюмируя, 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.

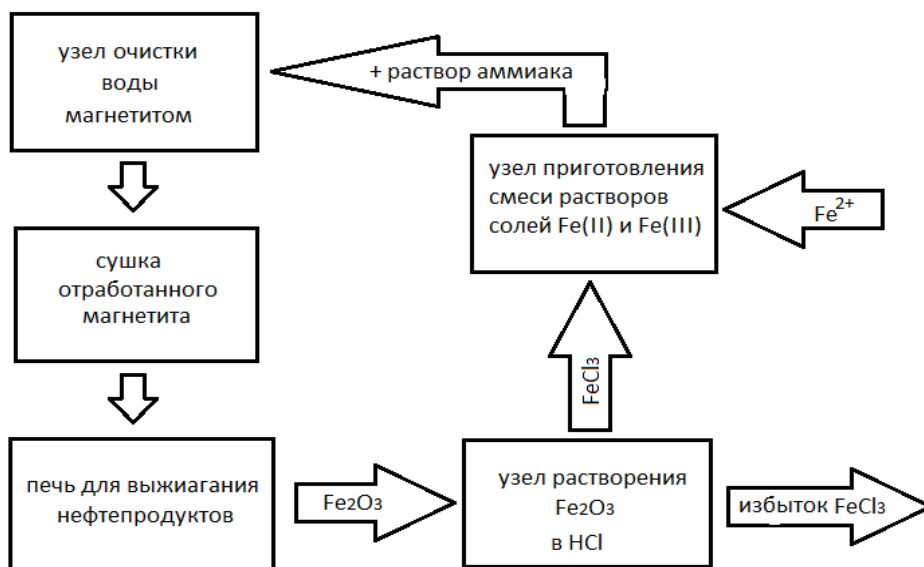
Схема работы установки для очистки пластовой воды, которая предполагает непрерывный цикл регенерации наночастиц магнетита Fe₃O₄. Следом за отстаиванием в резервуарах-отстойниках типа РВС-5000 или РВС-10000 пластовая вода поступает по линии 12 в резервуар 3, где перемешивается с нанодисперсным магнетитом. 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 прокачивается 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 14 – Схема работы установки

Принципиальная схема методики восстановления магнитных частиц может быть представлена следующим образом (рисунок 14). В соответствии с этой схемой, метод позволит обеспечить практически замкнутый технологический цикл.



**Рисунок 15 –
Технологическая
схема цикла
регенерации
наночастиц
магнетита.**

Основные выводы

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 рекомендуется 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 90^0 и 45^0 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.

**Основные опубликованные работы по теме диссертации
В журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:**

1. 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;
2. Лютоев, А. А. Разработка технологической схемы очистки сточных вод от нефтяных загрязнений с использованием магнитных наночастиц [Электронный ресурс]/ А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2013. – №4. – С. 424-435. URL: http://www.ogbus.ru/authors/LyutoevAA/LyutoevAA_1.pdf;
3. Лютоев, А. А. Оптимизация процесса магнитной очистки воды от нефтепродуктов методами системного анализа [текст] / А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов // Естественные и технические науки. – М.: «Спутник+». – 2013. – №4. – С.248-252;
4. Лютоев, А. А. Извлечение эмульгированных примесей нефти из воды при помощи высокодисперсных частиц магнетита / А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов, И. В. Ивенина // Защ. Окруж. среды в нефтегазовом комплексе. – 2014. – №4. – С. 40-45;
5. Лютоев, А. А. Оценка эффективности очистки пластовых вод от эмульгированных нефтепродуктов с применением системы магнитных частиц и магнитного поля / А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов, Е. А. Лютоева // Известия Коми научного центра Уро РАН № 1(25). Сыктывкар, 2016. – С.68-73;
6. 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;
7. Быков, И. Ю. Магнитный сепаратор для доочистки пластовой воды от эмульгированной нефти с применением нанодисперсного магнетита И. Ю. Быков, А. А Лютоев, Ю. Г. Смирнов, В. И. Семин // Строительство нефтяных и газовых скважин. – 2018.– № 8. – С. 56-61;
8. Быков, И. Ю. Неодимовый магнитный сепаратор НМС-1 для извлечения из пластовой воды эмульгированных нефтепродуктов с применением нанодисперсного магнетита / И. Ю. Быков, Н. Д. Цхадая, А. А Лютоев, Ю. Г. Смирнов, В. И. Семин // Socar Proceedings. – 2018. – № 4. – С. 11-17;
9. Быков, И. Ю. Кассетный магнитный сепаратор НМС-2 для доочистки пластовых вод от эмульгированных нефтепродуктов / И. Ю. Быков, А. А Лютоев, Ю. Г. Смирнов, В. И. Семин // Инженер – нефтяник . – 2018.– № 4. – С. 53-58;
10. Ивенина, И. В. Разработка технологии регенерации наночастиц магнетита в процессе очистки воды от эмульгированной нефти/ И. В. Ивенина, Ю. Г. Смирнов, А. А Лютоев, Е. И. Истомина // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 7.– С. 24–28;
11. Ивенина, И. В. Исследование эффективности извлечения нефти из водонефтяной эмульсии при помощи ферромагнитных наночастиц / И. В.

Ивенина, Ю. Г. Смирнов, А. А. Лютоев // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. – № 10. – С. 98–102;

В других изданиях:

12. Лютоев, А. А. Построение математической модели процесса извлечения из жидкости примесей с использованием магнитных наночастиц // XII Международная молодежная научная конференция “Севергеоэкотех-2011”: в 5 ч.; ч. 1. – Ухта: УГТУ, 2011. – С. 239–242;

13. Лютоев, А. А. Выбор оптимальных параметров наночастиц для систем очистки сточных вод [тезисы] // Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области технических наук: материалы работ победителей и лауреатов конкурса. – СПб.: Политехн. ун-т., 2012 – С. 372-373;

14. Лютоев, А. А. Моделирование магнитных свойств наночастиц оксидов железа для систем очистки [текст] / А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов // Комп. Моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и техн. системах: материалы VI Межд. Сем. (Воронеж, 30 июня 2012 г.): ч. I. – Воронеж: ВГТУ, 2012. – С. 123-129;

15. Лютоев, А. А. Разработка технологии использования магнитных частиц оксидов железа для очистки сточных вод нефтяных месторождений [текст] / А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов // Сборник научных трудов научно-технической конференции «Проблемы разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов», 15-16 ноября 2012 г. – Ухта, 2012. – С. 76-78;

16. Лютоев, А. А. Моделирование параметров системы очистки пластовых вод от нефтяных загрязнений с использованием магнитных наночастиц для оптимизации технологического процесса [тезисы] / А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов // Всероссийский конкурс научно-исслед. работ студентов и аспирантов в области тех. наук: матер. работ побед. и лаур. конкурса. – СПб.: Политехн. ун-т., 2013 – С. 25-26;

17. Лютоев, А. А. Агрегативная устойчивость одночастичной модели магнитного коллоида [текст] // Сборник научных трудов: материалы II Всероссийской научной конференции «Молодежь и наука на Севере». Том II. – Сыктывкар, Коми научный центр УрО РАН, 2013. – С.109-110;

18. Лютоев, А. А. Математическая модель седиментационной устойчивости магнитных частиц оксидов железа в жидкой среде [текст] / А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов // Физико-математическое моделирование систем: IX Международный семинар, 30 ноября – 1 декабря 2012 г.: в 3 ч. ; ч. 3. – Воронеж: ВГТУ, 2012. – С. 7-10;

19. Лютоев, А. А. Численное моделирование очистки пластовых вод нефтяных месторождений с использованием магнитных частиц [текст] / А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов // Материалы международного семинара «Рассохинские чтения», 8-9 февраля 2013 года: в 2 ч.; ч. 1. – Ухта, 2013. – С. 227-231;

20. Лютоев, А. А. Моделирование работы ферромагнитного разделителя для очистки пластовых вод от нефтяных загрязнений / А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов // Физико-математическое моделирование систем: материалы XI Междунар. семинара. Ч. 2. - Воронеж: ФГБОУ ВПО ВГТУ, 2014.– С. 77-84;

21. Лютоев, А. А. Моделирование магнитного поля стержней ферромагнитной упаковки фильтра очистки пластовых вод от нефтяных загрязнений [текст] / А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов // Материалы международного семинара «Рассохинские чтения», 4-5 февраля 2016 года: в 2 ч.; ч. 2. – Ухта, 2016. – С. 120-123;

22. Лютоев, А. А. Компьютерное моделирование параметров магнитной ловушки системы очистки воды от нефтяных эмульсий / А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов // Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах (КМЭП-7): матер. VII Международного семинара. Воронеж, 23 сентября 2016 г., Воронеж: Изд-во «Научная книга», 2016. – С. 57-60;

23. Лютоев, А. А. Моделирование режима работы кассеты магнитного сепаратора / А. А. Лютоев, Ю. Г. Смирнов // Физико–математическое моделирование систем: материалы XX Междунар. семинара. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2019. – С. 112-119.