

На правах рукописи



Куимов Денис Николаевич

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ДИСКРЕТНОЙ
ВТОРИЧНОЙ ЧАСТЬЮ В СИСТЕМАХ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ**

Специальность: 05.09.01 –Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новочеркасск - 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Павленко Александр Валентинович

Официальные оппоненты **Казаков Юрий Борисович** доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Электромеханика» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Шайхиев Алексей Рифкатович кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары

Защита диссертации состоится 21 декабря 2018 г. в 13 часов 30 минут. На заседании диссертационного совета Д 212.304.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» в ауд. 149 главного корпуса по адресу: 346428 г. Новочеркасск Ростовской области, ул. Просвещения, 132.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» и на сайте <http://npi-tu.ru>.

Автореферат разослан _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.304.08



Шафорост Дмитрий Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С увеличением доли добычи высокосернистой и сернистой нефти задача предварительной десульфуризации сырой нефти приобретает все более актуальное значение. Проблемы процесса предварительной десульфуризации, реализуемого существующими на сегодняшний день традиционными методами, могут быть связаны с селективностью к удаляемым сернистым соединениям, сложностью системы, а также использованием большого количества расходных материалов, в том числе дорогостоящих катализаторов. Есть основание полагать, что воздействие гидродинамической кавитацией на сырую нефть приводит к ее десульфуризации. Наиболее перспективным генератором гидродинамической кавитации является устройство с дискретной вторичной частью, именуемое в настоящей диссертационной работе как электромеханический преобразователь с дискретной вторичной частью (ЭПДВЧ). Для создания интенсивной гидродинамической кавитации по всему объему рабочей камеры необходимо обеспечить регулируемое движение большой совокупности ферромагнитных элементов. Разработка новой эффективной конструкции ЭПДВЧ с улучшенными характеристиками процесса движения вторичной дискретной части связана в первую очередь с увеличением длины и скорости свободного пробега ее элементов – важных для подавляющего большинства реализуемых технологических процессов. Для решения данной задачи требуется создание новой методики оптимального проектирования, основанной на оценке параметров процесса перемещения элементов вторичной дискретной части.

Работа соответствует научному направлению ЮРГПУ (НПИ) «Интеллектуальные электромеханические устройства, системы и комплексы».

Степень разработанности темы исследования. Теория устройств с дискретной вторичной частью интенсивно развивается по сегодняшний день, начиная с 50-х годов XX века, благодаря чему применение уникальных электромеханических преобразователей стало возможным в различных отраслях промышленности. Высокая эффективность работы устройств с дискретной вторичной частью заключается в особенностях рабочего органа, представленного набором ферромагнитных элементов. На сегодняшний день основное внимание в научно-технической литературе уделялось вопросам устранения «мертвых» зон 1-го и 2-го порядка. Основываясь на главенствующей роли гидродинамической кавитации в процессе обработки жидких углеводородов, можно сделать вывод, что характер процесса движения ферромагнитных элементов существенно влияет на интенсивность кавитационных процессов. Сложные и разнообразные задачи исследования траектории движения вторичной дискретной части и возникающих кавитационных процессов в диссертационной работе рассмотрены во взаимосвязи.

Цель диссертации: Совершенствование конструкций электромеханических преобразователей с дискретной вторичной частью путем создания новых алгоритмов, математических моделей и методик для их исследования и оптимизированного проектирования, основанных на оценке процесса движения эле-

ментов вторичной дискретной части, что позволит проводить анализ эффективности работы устройства на этапе его создания до изготовления экспериментального образца и в целом, ускорить процесс проектирования.

Объект исследования: Электромеханический преобразователь с дискретной вторичной частью.

Предмет исследования: Физические процессы, происходящие в рабочей камере электромеханического преобразователя с дискретной вторичной частью.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Проведение аналитического обзора существующих конструкций и анализ условий эксплуатации электромеханических преобразователей с дискретной вторичной частью.

2. Разработка математических моделей и алгоритмов проектирования ЭПДВЧ, основанных на изучении характера процесса движения дискретной вторичной части.

3. Математическое моделирование и исследование траектории движения единичного ферромагнитного элемента.

4. Разработка алгоритмов коммутации обмоток индуктора, реализующих движение ферромагнитных элементов по заданной траектории.

5. Исследование влияния интенсивного движения большой совокупности ферромагнитных элементов на процесс обработки сырой нефти.

6. Разработка экспериментального образца ЭПДВЧ и проведение экспериментальных исследований.

7. Экономическая оценка целесообразности применения ЭПДВЧ для реализации процесса десульфуризации нефти.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем:

- разработана и практически обоснована конфигурация магнитной системы ЭПДВЧ на основе применения многофазного индуктора, обеспечивающего управление процессом движения дискретной вторичной части во времени и пространстве рабочей камеры;

- предложен алгоритм оптимального проектирования ЭПДВЧ, отличающийся от существующих тем, что использует многокомпонентную функцию, обеспечивающую при оптимизации магнитной системы равномерное распределение магнитной индукции по объему рабочей камеры и увеличение электромагнитного момента;

- по результатам математического моделирования определена траектория движения ферромагнитных элементов, устраняющая, в отличие от существующих, «мертвые» зоны 1-го и 2-го порядка, предложен алгоритм коммутации фаз индуктора;

- получены новые соотношения для расчета основных технологических параметров, связывающих процесс движения элементов дискретной вторичной части ЭПДВЧ с процессом десульфуризации нефти, которые могут быть использованы при анализе и проектировании ЭПДВЧ.

Теоретическая и практическая значимость.

1. Предложена методика проектирования ЭПДВЧ из условия обеспечения максимального электромагнитного усилия, действующего на ферромагнитные элементы, по всему объему рабочей камеры;

2. Разработан алгоритм коммутации фаз индуктора, обеспечивающий в процессе работы устройства равномерное движение вторичной дискретной части по всему объему рабочей камеры, тем самым устраняя «мертвые» зоны 1-го и 2-го порядка;

3. Спроектирован и изготовлен экспериментальный образец ЭПДВЧ, проведены испытания.

Результаты диссертационного исследования использованы в НИИ Электромеханики ЮРГПУ(НПИ), ООО НПП «Сельсофт», в учебном процессе кафедры «Электромеханика и электрические аппараты»

Материалы работы могут быть использованы для улучшения эксплуатационных показателей устройств с дискретной вторичной частью, в частности: увеличения эффективности работы устройства за счет устранения «мертвых» зон 1-го и 2-го порядка и управления процессом движения вторичной дискретной части, что в целом позволит повысить конкурентоспособность ЭПДВЧ среди устройств, предназначенных для обрабатывания различных жидких материалов, в том числе сырой нефти.

Методология и методы исследования базируются на элементах теории электрических и магнитных цепей, опыте проектирования устройств с дискретной вторичной частью и индукторных машин, численных расчетах электромагнитного поля, законах механики жидкостей. Экспериментальные исследования работы ЭПДВЧ проводились в лабораторных условиях на экспериментальном образце устройства.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанный ЭПДВЧ для обработки сырой нефти (полезная модель), обеспечивающий устранение «мертвых» зон 1-го и 2-го порядка;
- методика и алгоритм проектирования ЭПДВЧ;
- методика оценки эффективности процесса десульфуризации в ЭПДВЧ;
- результаты экспериментальных исследований ЭПДВЧ при реализации процесса десульфуризации нефти.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным применением фундаментальных законов, описывающих физические явления и процессы, протекающие в рабочей камере ЭПДВЧ и положительными результатами испытаний экспериментального образца устройства.

Апробация. Основные научные и технические результаты были представлены на: XII Международной научно-технической конференции «Динамика технических систем» (г. Ростов-на-Дону, 16-17 декабря 2015 г.); Международной научно-технической конференции Пром-инжиниринг-2016 (г. Ростов-на-Дону, 19-20 мая 2016); XIII Международной научно-технической конференции «Динамика технических систем» (г. Ростов-на-Дону, 13-16 сентября 2017 г.), на

научных семинарах кафедры «Электромеханика и электрические аппараты», ЮРГПУ(НПИ) (г. Новочеркасск, 2016-2017 г.).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в семи публикациях, в том числе в двух работах в журналах из перечня ВАК, трех в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus и одном патенте на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, списка использованной литературы и приложений. Полный объем работы составляет 131 страниц текста, иллюстрированного 34 рисунками и 12 таблицами. Список использованной литературы включает 91 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, представлена общая характеристика работы.

В первой главе проведен краткий обзор конструкций устройств с дискретной вторичной частью и анализ условий эксплуатации устройства. Выполнен обзор методик проектирования. Установлено, что среди множества различных типов устройств с дискретной вторичной частью, наиболее распространенной является конструкция (Рисунок 1), состоящая из цилиндрического индуктора и трехфазной распределенной обмотки. В качестве рабочего органа во всех проанализированных устройствах используется большая совокупность ферромагнитных тел, размещенных в рабочей камере, и совершающих сложное движение под воздействием внешнего электромагнитного поля. Вследствие наличия большого немагнитного зазора, вызванного отсутствием внутреннего монолитного сердечника, конструкция электромеханического преобразователя обладает рядом недостатков, среди которых наличие «мертвых» зон 1-го и 2-го порядка.

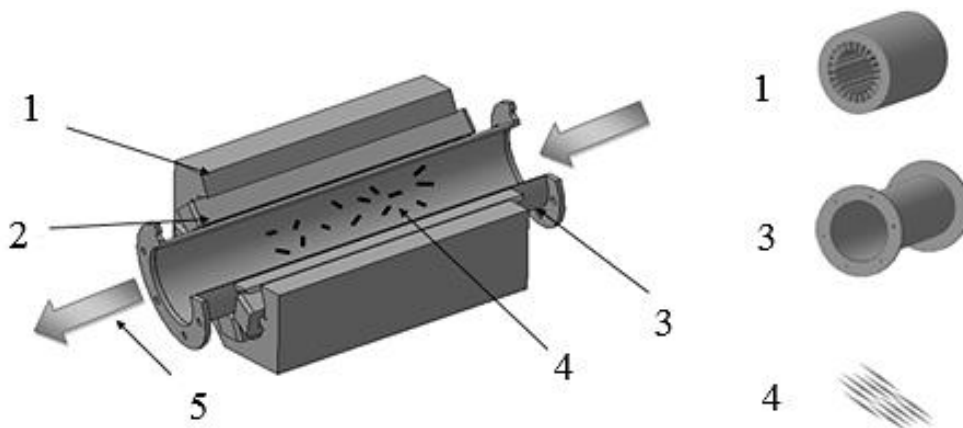


Рисунок 1 - Стандартная конструкция устройства с дискретной вторичной частью:

1 – корпус устройства; 2 – обмотка; 3 – труба из немагнитного материала; 4 – ферромагнитные элементы; 5 – поток обрабатываемого сырья

Установлено, что одним из основных факторов наличия «мертвых» зон является неравномерность распределения электромагнитного поля в рабочей камере, когда магнитная индукция в области углов зубцов статора превышает аналогичный показатель в центре рабочей камеры в 4-х кратном размере (Рисунок 2). «Мертвая» зона 1-го порядка находится в области углов зубцов индуктора, где основная часть ферромагнитных элементов, под воздействием высоких значений магнитной индукции, сконцентрирована и неподвижна. Область действия «мертвой» зоны 2-го порядка находится вдоль оси рабочей камеры, где ферромагнитные элементы отсутствуют. В результате, менее половины рабочих элементов, в процессе работы устройства вовлекаются в движение, снижая интенсивность и качество обработки материала.

Были проанализированы существующие в настоящее время методы и технические решения устранения «мертвых» зон в устройствах с дискретной вторичной частью. Определено, что они имеют достаточно трудоемкий характер реализации и существенно влияют на эксплуатационные показатели устройства.

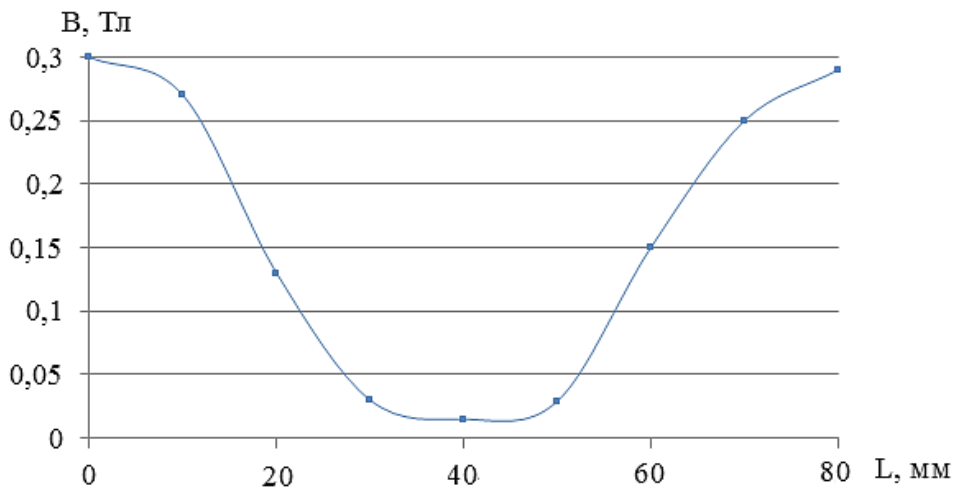


Рисунок 2 - Распределение магнитной индукции в диаметральной плоскости

В соответствии с этим возникла необходимость создания ЭПДВЧ, позволяющего устранить указанные недостатки, сохранив и усилив основное энергетическое воздействие – гидродинамическую кавитацию. В качестве наиболее перспективного варианта выбора конфигурации магнитной системы устройства предложен статор индукторной машины с многофазной сосредоточенной обмоткой.

Вторая глава посвящена описанию методики проектирования ЭПДВЧ, включающей электромагнитный и тепловой расчеты.

Обзор методик проектирования, проведенных в первой главе, показал, что применительно к устройствам с дискретной вторичной частью расчетные методики целесообразно строить на основе оценки процесса движения дискретной вторичной части. В связи с невозможностью применения классических методик расчета электрических машин важным инструментом при оценке про-

цесса движения вторичной дискретной части становится применение пакета программы численного моделирования электромагнитного поля Ansys Maxwell.

По аналогии с индукторными машинами в конструкции ЭПДВЧ были выделены основные размеры. К ним могут быть отнесены внешний и внутренний диаметры индуктора D_e и D_i . Значение D_i на основании анализа существующих разработок устройств с дискретной вторичной частью, при проектировании ЭПДВЧ можно считать заданным и равным 80 мм, при котором достигается эффективное распределение магнитной индукции в рабочей камере и оптимальное «живое» сечение. Далее можно вычислить величины высоты зубца индуктора h_z , ширины зубца b_z , а также высоту ярма h_a .

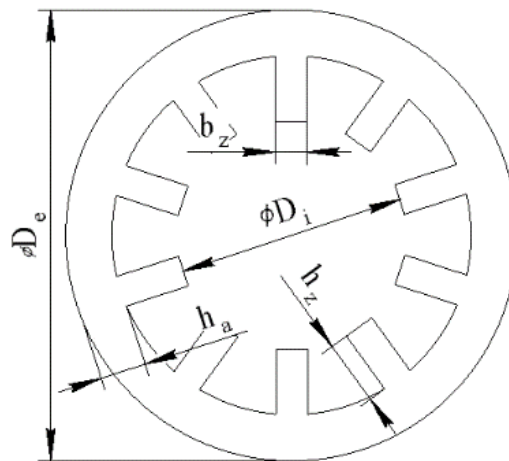


Рисунок 3 - Эскиз индуктора

По предлагаемой методике были рассчитаны геометрические размеры для трех конфигураций магнитной системы с 8, 10 и 12 зубцами (Рисунок 4).

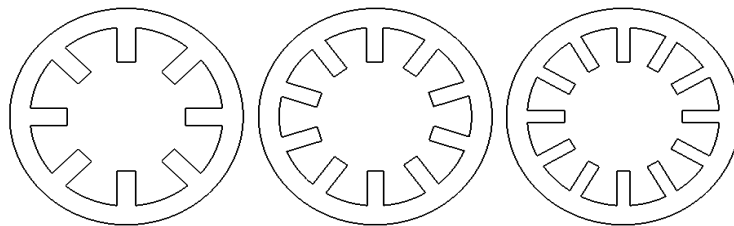


Рисунок 4 - Варианты исследуемых конфигураций магнитных систем

Для трех конфигураций магнитной системы с полученными размерами и обмоточными данными проводилось математическое моделирование электромагнитного поля с использованием пакета программ Ansys. Ansys Maxwell – это один из наиболее распространенных программных пакетов моделирования электромагнитных полей и исследования двумерных и трехмерных моделей, базирующийся на методе конечных элементов (Finite Element Method – FEM).

В рамках пакета Ansys задача исследования трех конфигураций магнитной системы решалась для трехмерной модели, показанной на рисунке 5. Результаты анализа представлены в Таблице 1.

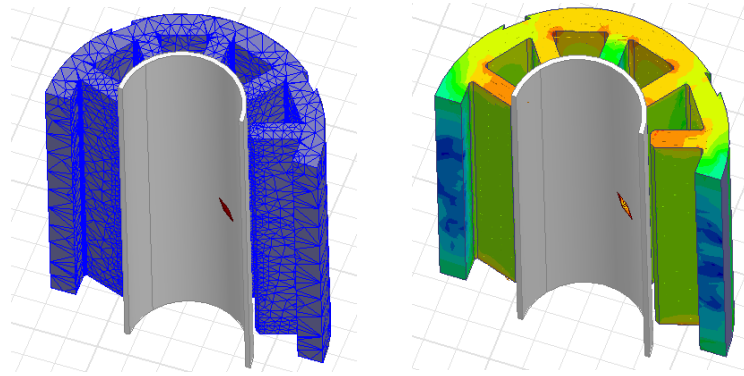


Рисунок 5 - Расчетная область ЭПДВЧ с граничными условиями

Таблица 1 – Результаты исследования конфигураций индукторов

Показатель	Варианты конфигураций индукторов		
	$z=8, w=160$	$z=10, w=130$	$z=12, w=100$
$B_{cp}, Tл$	0,09	0,08	0,065
$L, м$	0,034	0,027	0,023
$F_{эм}, Н$	0,06	0,12	0,09

Из представленной таблицы видно, что максимальные показатели эффективности, в том числе среднее значение магнитной индукции по объему рабочей камеры B_{cp} и электромагнитное усилие $F_{эм}$, действующее на ферромагнитный элемент на максимальном удалении от активного полюса, равном расстоянию между двумя смежными полюсами индуктора L , имеет конфигурация с числом зубцов $z=10$ и количеством витков обмотки $w=130$, которая была выбрана для дальнейшей оптимизации.

Предварительный проектный расчет дал возможность определить диапазон изменения корректируемых параметров и выбрать начальную точку оптимизации. В качестве параметров оптимизации были выбраны геометрические размеры зубцовой зоны электромеханического преобразователя (Рисунок 6, а): высота коронки зубца индуктора b_1 ; ширина зубца индуктора b_2 ; ширина коронки зубца b_3 .

Для получения наиболее точных результатов при оптимизации зубцовой зоны индуктора электромеханического преобразователя с дискретной вторичной частью предложено использовать многокомпонентную целевую функцию следующего вида:

$$F_{ц} = k_1 \left(\frac{F_{мц} - F_{мТ}}{F_{мц}} \right) + k_2 \left(\frac{B_{ц} - B_{Т}}{B_{ц}} \right) + k_3 \left(\frac{t_{ц} - t}{t_{ц}} \right) + k_4 \left(\frac{B_{стц} - B_{стТ}}{B_{стц}} \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 – весовые коэффициенты для каждого критерия оптимизации; $F_{мц}$, $F_{мТ}$ – целевое и текущее среднее значение электромагнитного усилия, действующего на единичный ферромагнитный элемент со стороны электромагнитного поля, H ; $B_{ц}$, $B_{Т}$ – целевое и текущее среднее значение магнитной индукции по объему рабочей камеры, Тл; $t_{ц}$, $t_{цТ}$ – целевое и текущее значение температуры

стали магнитопровода, °C; $B_{стц}$, $B_{стГ}$ – целевое и текущее среднее значение магнитной индукции в стали зубца индуктора, Тл.

При решении поставленной задачи применялся стохастический алгоритм оптимизации Монте-Карло. Результаты оптимизационного проектирования представлены на Рисунке 6, б.

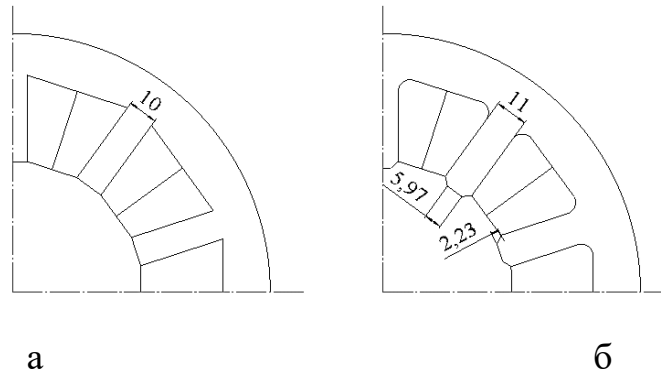


Рисунок 6 - Сечение зубцовой зоны: а – на основании расчетных данных; б – после оптимизационных расчетов.

Таблица 2 – Сравнение показателей до и после оптимизационных расчетов

Расстояние от активного полюса, мм	Усилие для исходного индуктора, Н	Усилие для оптимизированного индуктора, Н	Увеличение, %
0	0,9	1,1	18,1
20	0,64	0,87	26,4
23	0,3	0,67	55,2
29	0,2	0,3	33
34	0,18	0,21	14

После определения геометрических размеров ЭПДВЧ и его обмоточных параметров выполнен уточненный тепловой расчет, реализованный в программном пакете FEMM 4.2. Для более эффективного охлаждения при проектировании индуктора ЭПДВЧ, работающего в продолжительном режиме работы, необходимо предпринять ряд мер, в том числе предусмотреть аксиальные вентиляционные каналы, и газовые трубки в пазу индуктора для отвода теплоты непосредственно от обмоток, через которые проходит охлаждающий газ.

В третьей главе представлено математическое моделирование и анализ процесса движения вторичной дискретной части. Наличие в ЭПДВЧ нескольких обмоток требует создания специального устройства управления, обеспечивающего движение элементов вторичной дискретной части по заданной траектории. Последовательность включения обмоток должна обеспечивать перемещение большой совокупности ферромагнитных элементов по всему объему рабочей камеры, устраняя «мертвые» зоны 1-го и 2-го порядка. Это приводит к необходимости исследования процесса движения рабочих элементов на перио-

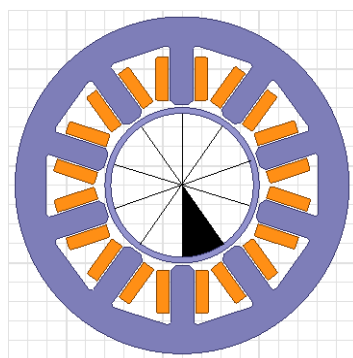
де повторяемости. Таким периодом является промежуток времени, за который ферромагнитный элемент совершает перемещение от одного активного полюса к другому.

ЭПДВЧ может иметь несколько основных видов алгоритмов управления фазами: одиночный и парный симметричный в качестве базовых и один специальный несимметричный алгоритм, предполагающий включение комбинации нескольких катушек, для создания условий перемещения ферромагнитных элементов через центр рабочей камеры. Ввиду дискретного характера перемещения электромагнитного поля анализ эффективности алгоритмов коммутации проводился для единичной области на периоде повторяемости – между двумя полюсами индуктора.

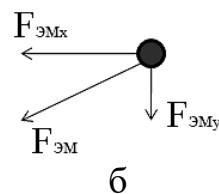
Для устранения «мертвой» зоны 1-го порядка необходимо обеспечить максимум электромагнитного усилия $F_{эмх}$ (Рисунок 7) вдоль проекции оси ОХ, когда ферромагнитный элемент движется, в основном, вдоль указанной оси. В противном случае, при значительном превышении электромагнитного усилия вдоль оси ОУ над аналогичным показателем вдоль оси ОХ ферромагнитный элемент «залипает» в межзубцовой зоне, не пройдя путь до зоны взаимодействия со следующим полюсом.

Отдельного внимания требует наиболее сложный, с точки зрения реализации, специальный алгоритм коммутации силовых ключей, создающий условия для перемещения вторичной дискретной части через центр рабочей камеры.

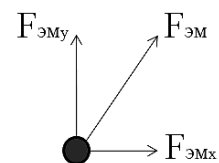
Для устранения «мертвой» зоны 2-го порядка и создания условий перемещения элемента через центр рабочей камеры необходимо обеспечить максимальное значение усилия $F_{эму}$ вдоль оси ОУ, когда ферромагнитный элемент движется, в основном, вдоль этой оси, перемещаясь к центру рабочей камеры. В противном случае, ферромагнитный элемент притянется к ближайшему возбуждённому полюсу вдоль рабочей камеры.



а



б



в

Рисунок 7 - Область угловой зоны рабочей камеры и проекции сил: а – исследуемая область, б – проекции сил при перемещении по окружности, в – проекции сил при перемещении через центр

На основе многочисленных исследований различных комбинаций коммутации фаз предложен алгоритм коммутации, представленный на Рисунке 8.

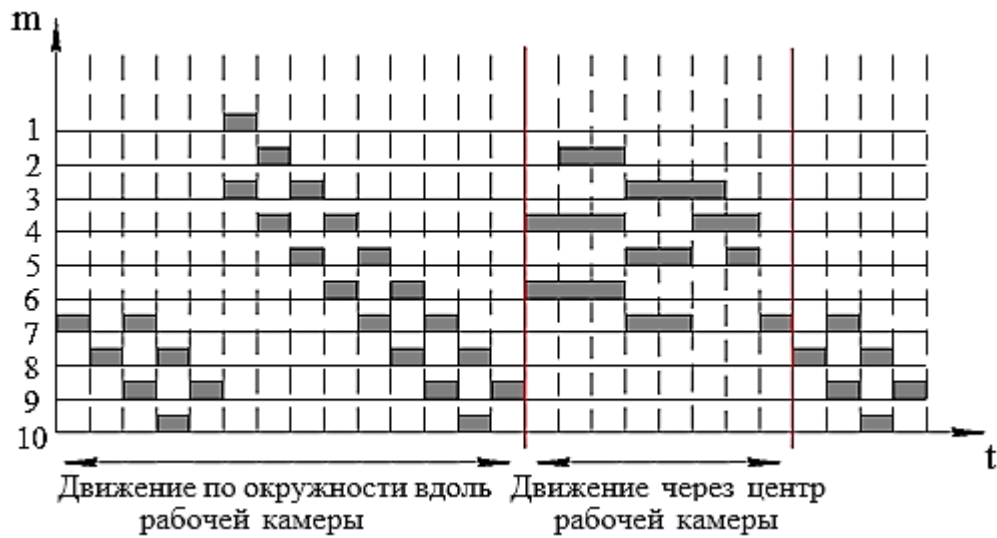


Рисунок 8 - Алгоритм коммутации фаз

Результаты анализа представлены для одиночного и парного алгоритмов при осуществлении движения по окружности, а также двух несимметричных алгоритмов при осуществлении движения рабочих элементов через центр рабочей камеры (Рисунки 9,10).

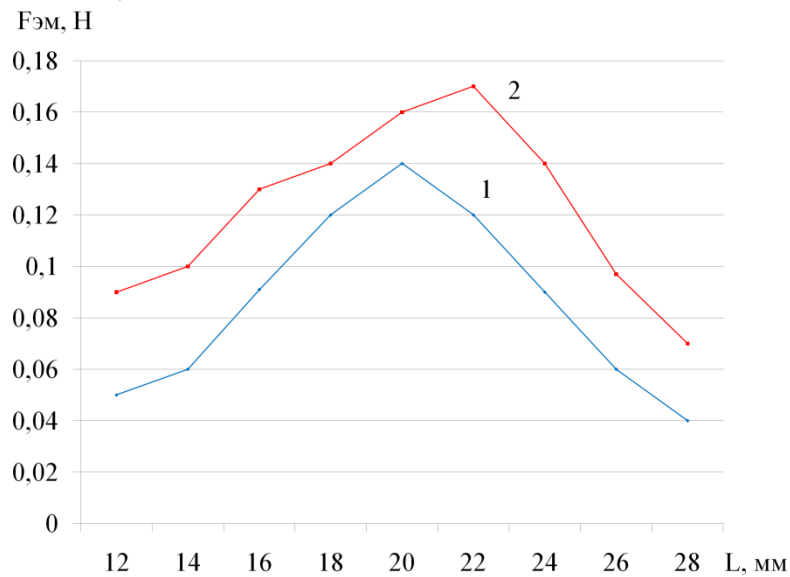


Рисунок 9 - Распределение электромагнитного усилия по оси OX в хордовом направлении от активного полюса, 1 – при одиночном; 2 – при парном алгоритме

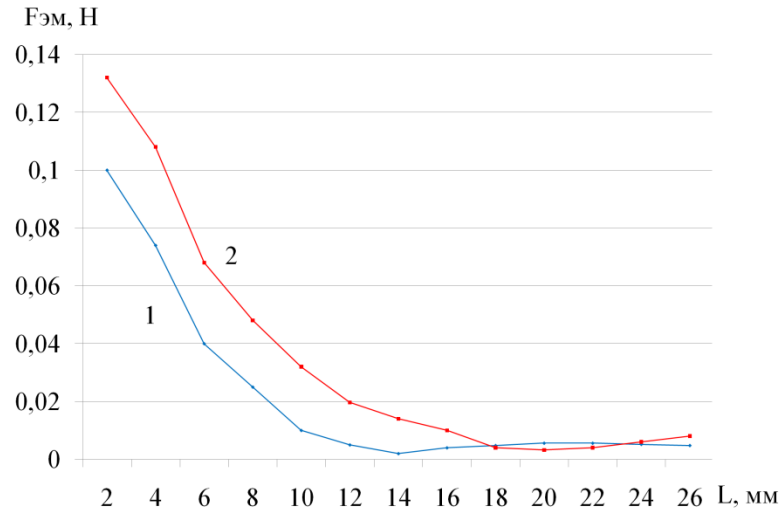


Рисунок 10 - Распределение электромагнитного усилия по оси OX в диаметральной направлении, 1 – при одиночном; 2 – при парном алгоритме

На этапе математического моделирования процесса движения дискретной вторичной части рассмотрен процесс движения единичного ферромагнитного элемента в объеме рабочей камеры. При этом объем рабочей камеры заполнен высоковязкой жидкостью. Дискретное перемещение электромагнитного поля дает основание предполагать, что абсолютное большинство рабочих элементов будет двигаться направленно и последовательно от одного активного полюса к другому. Однако даже в таком случае, в процессе работы реального устройства, движение большой совокупности ферромагнитных элементов будет сопровождаться соударениями, порождая постоянные отклонения от основной траектории перемещения. Оценить процесс движения большой совокупности ферромагнитных элементов с учетом отклонений и всех сопутствующих микротраекторий не представляется возможным. В рамках решаемой задачи анализа основной траектории движения вторичной дискретной части, рассматривается расстановка элементов по рабочей камере, приближающаяся к одному элементу на один кубический метр пространства.

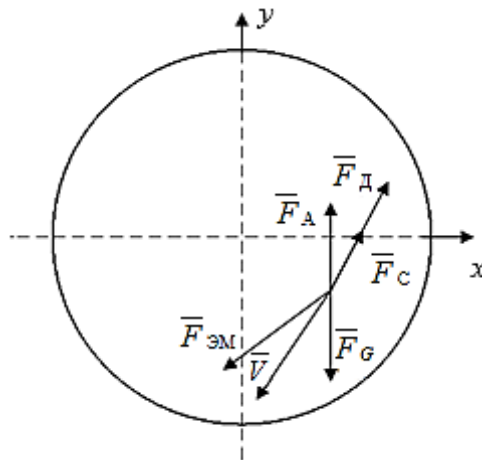


Рисунок 11 - Схема сил, действующих на единичный ферромагнитный элемент в жидкой среде, в области действия магнитного поля

На Рисунке 11 схематично показаны силы, действующие на единичный ферромагнитный элемент при движении в вязкой жидкости в области действия внешнего электромагнитного поля.

На рабочий элемент в рамках реализуемой математической модели действуют следующие силы: гравитационная сила \overline{F}^G ; сила Архимеда \overline{F}^A ; электромагнитная сила $\overline{F}^{\text{ЭМ}}$; сила сопротивления среды \overline{F}^C ; сила присоединенной массы \overline{F}^d .

Используя законы классической механики, получаем систему дифференциальных уравнений движения единичного ферромагнитного элемента по объему рабочей камеры:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{F_{\text{ЭМ}x}}{m_3} - \frac{1}{2m_3} c S_M \rho_{\text{ж}} \dot{x} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \\ \ddot{y} = \frac{F_{\text{ЭМ}y}}{m_3} - \frac{1}{2m_3} c S_M \rho_{\text{ж}} \dot{y} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} - \frac{g V_3}{m_3} (\rho_3 - \rho_{\text{ж}}) \end{cases} \quad (2)$$

Система дифференциальных уравнений (2) решена численно с использованием программного пакета Matlab. Численный эксперимент проводился для выбранного алгоритма коммутации.

В результате проведенного численного эксперимента была графически построена траектория движения единичного ферромагнитного элемента по объему рабочей камеры (Рисунок 12). Также были определены основные величины, характеризующие процесс движения элемента: длина свободного пробега элемента до соприкосновения с поверхностью рабочей камеры; средняя и максимальная скорость движения элемента; время движения элемента, соответствующее времени одного полного цикла коммутации.

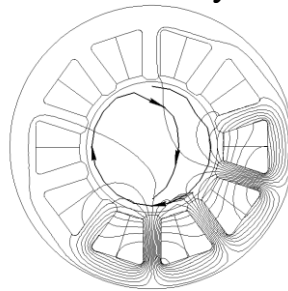


Рисунок 11 - Траектория движения единичного ферромагнитного элемента

Анализ полученных в процессе численного эксперимента параметров движения единичного ферромагнитного элемента использовался для оценки эффективности реализуемого процесса десульфуризации сырой нефти. Эффективность устройства обуславливается количеством разорванных и удаленных из сырой нефти сераорганических соединений под воздействием гидродинамической кавитации. Энергия, выделяемая при схлопывании кавитационных пузырьков, вычисляется как

$$W_{\text{кин}} = k_{\text{к}} V_{\text{ж}} 2\pi\rho \left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{P}{\rho}\right) \left(\frac{R_0^3}{R^3} - 1\right) R^3, \quad (4)$$

На основании результатов анализа научных работ известно, что процесс десульфуризации под воздействием кавитации осуществляется путем разрыва сернистых соединений в одну стадию по связи С-S, при достижении необходимого значения энергии разрыва связи. В рамках данного исследования, чтобы определить объем жидкого углеводородного сырья, подвергнутого обработке под воздействием гидродинамической кавитации, необходимо определить объем жидкости, вытесненной каждым ферромагнитным элементом в процессе движения с критической скоростью, при которой выполняется условие возникновения кавитации.

$$V_{\text{ж}} = N_{\text{эл}} \pi r^2 L_{\text{ср}} 15k_{\text{тр}} + N_{\text{эл}} \pi r^2 L_{\text{ц}} 3k_{\text{тр}}, \quad (5)$$

Анализ траектории движения единичного ферромагнитного элемента показал, что перемещение элемента от одного активного полюса к другому, сопровождаясь этапами разгона и торможения, создает гидродинамическую кавитацию лишь в некоторой части пройденного пути из-за непостоянной скорости движения. Для упрощения дальнейших расчетов был введен коэффициент траектории $k_{\text{тр}}$, показывающий долю пути, пройденного ферромагнитным элементом со скоростью, выше или равной критической. Для анализируемой траектории коэффициент при движении вдоль стенки рабочей камеры составляет 0,86, а при движении через центр рабочей камеры - 0,6.

Следует также отметить, что увеличение концентрации ферромагнитных элементов, вопреки распространенному мнению, оказывая существенное влияние на характер электромагнитного поля, при определенном критическом значении может привести к существенному снижению эффективности кавитационных процессов. Данный эффект объясняется сокращением длины свободного пробега каждого элемента в отдельности и снижением общей энергии, выделяемой при гидродинамической кавитации. Результаты проведенных расчетов полной энергии (Рисунок 13), выделяемой за один цикл обработки в зависимости от концентрации дискретной вторичной части, выраженной в количестве ферромагнитных элементов, показали, что наиболее эффективной для данной конфигурации устройства является концентрация $0,2 \text{ кг/м}^3$, что соответствует 400 элементам.

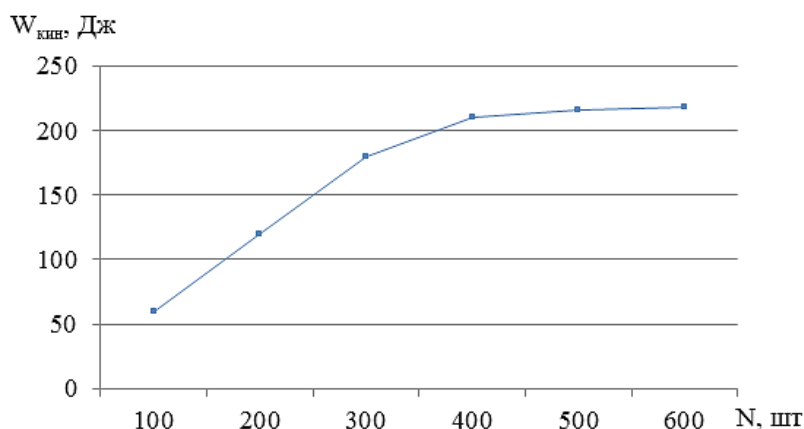


Рисунок 13 - Зависимость максимального значения кинетической энергии, выделенной в процессе схлопывания кавитационных пузырьков от количества ферромагнитных элементов

На Рисунке 14 показан результат расчета динамики удаления сернистых соединений. Алгоритм расчета состоял из нескольких основных последовательных этапов, в том числе определение энергии, выделяемой при схлопывании кавитационных пузырьков, определение молярной массы разорванных соединений серы, определение молярной массы остаточной серы и равномерное распределение сернистых соединений серы по объему рабочей камеры. Данный цикл повторялся до тех пор, пока наблюдалось уменьшение общего количества остаточных соединений серы.

Согласно полученным результатам, можно отметить хорошее удаление сернистых соединений в первые 20 сек обработки. Дальнейшее удаление замедляется из-за постоянного перемешивания и снижения концентрации сернистых соединений.

Таким образом, совместная оценка процесса десульфуризации и анализ процесса движения ферромагнитных элементов позволяет на этапе проектирования ЭПДВЧ выбрать наиболее эффективную траекторию движения и сформулировать рекомендации по повышению эффективности процесса десульфуризации.

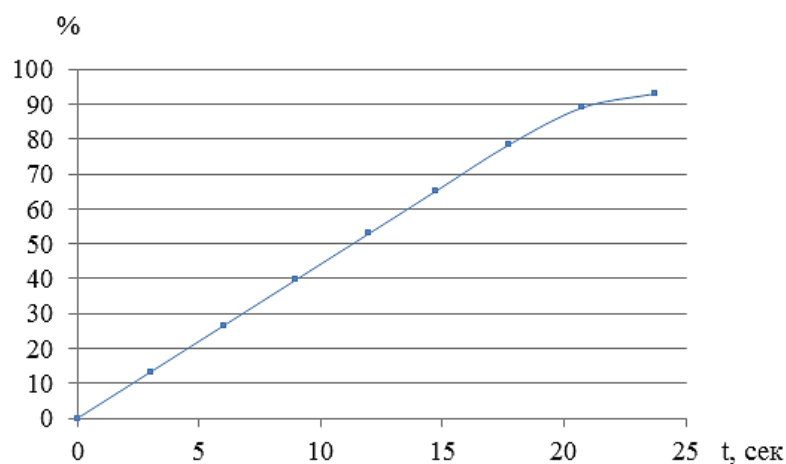


Рисунок 14 - Динамика процесса десульфуризации сырой нефти

В четвертой главе рассмотрены вопросы технической реализации экспериментальных исследований. Приведены описание конструкции и особенностей работы созданного макета экспериментальной установки и результаты экспериментальных исследований, выполнена оценка экономической эффективности предлагаемой технологии.

Важнейшей эксплуатационной характеристикой ЭПДВЧ является зависимость эффективности удаления сернистых соединений от времени обработки. Для подтверждения эффективности реализуемого процесса десульфуризации сырой нефти были проведены работы по изготовлению экспериментального образца ЭПДВЧ с последующим проведением серий сравнительных экспериментов по снижению содержания сераорганических соединений в сырой нефти при различном времени обработки. Эксперимент проводился при температуре сырья 70 °С.

Качество процесса десульфуризации сырой нефти в ЭПДВЧ определялось путем отбора проб нефти, прошедшей обработку в устройстве в течение 10,20,30 и 40 сек. Результаты проведенных экспериментальных исследований приведены в Таблице 3.

Таблица 3 – Результаты исследования эффективности десульфуризации

№ испытания	Время обработки, сек				
	0	10	20	30	40
	Доля содержания серы, %				
1	2,8	1,68	0,28	0,12	0,08
2	2,8	1,64	0,31	0,09	0,05
3	2,8	1,67	0,27	0,08	0,06
4	2,8	1,66	0,28	0,10	0,07
5	2,8	1,65	0,31	0,07	0,05
6	2,8	1,63	0,28	0,08	0,05
7	2,8	1,68	0,29	0,11	0,08
8	2,8	1,69	0,27	0,08	0,04
9	2,8	1,65	0,28	0,09	0,07
10	2,8	1,67	0,28	0,08	0,06

Количественное содержание серы в нефтепродуктах определялось методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии. При обработке нефти с высоким содержанием серы в ЭПДВЧ, происходит суммарная эффективная очистка от примесей сульфидов и тиофенов. Максимальная очистка нефти по результатам экспериментальных исследований составила 98,57 %. Общий разброс результатов испытаний не превышает 1,5 %.

В заключительной части главы определена экономическая эффективность разработанного устройства. Техничко-экономические расчеты показали, что десульфуризация сырой нефти гидродинамической обработкой в разработанном ЭПДВЧ является экономически более целесообразной по сравнению с распро-

страненными на нефтеперерабатывающих производствах технологиями и методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Выполненный анализ имеющихся литературных данных показал, что интенсификация процесса десульфуризации в ЭПДВЧ может быть достигнута при устранении «мертвых» зон 1-го и 2-го порядка и осуществлении регулируемого процесса движения элементами вторичной дискретной части. Наиболее перспективным направлением является использование многофазного индуктора в качестве магнитной системы.

2. Для решения поставленных в диссертационной работе задач разработана методика проектирования ЭПДВЧ на основе оценки процесса движения вторичной дискретной части, позволяющая определить основные геометрические размеры и обмоточные параметры индуктора при выполнении условия обеспечения максимального электромагнитного усилия на различном удалении от активного полюса.

3. Разработана математическая модель траектории движения под воздействием внешнего электромагнитного поля единичного ферромагнитного элемента в жидкой среде.

4. Предложен алгоритм коммутации фаз индуктора устройства, устраняющий «мертвые» зоны 1-го и 2-го порядка и обеспечивающий максимальное электромагнитное усилие, действующее на единичный ферромагнитный элемент.

5. Предложена методика исследования эффективности технологического процесса десульфуризации, связывающая параметры процесса движения единичного ферромагнитного элемента, условия возникновения гидродинамической кавитации и свойства обрабатываемого материала. Введено понятие коэффициента траектории $k_{тр}$, значение которого показывает долю пути, пройденного ферромагнитным элементом с критической скоростью образования кавитации. Достоверность методики подтверждена результатами экспериментальных исследований.

6. Сформулированы требования к эффективной концентрации ферромагнитных элементов в рабочей камере устройства. Показано, что превышение плотности ферромагнитных элементов свыше $0,2 \text{ кг/м}^3$ нецелесообразно, из-за снижающегося эффекта от гидродинамической кавитации.

7. На основе разработанной методики расчета спроектирован экспериментальный образец ЭПДВЧ, обеспечивающий заданные характеристики и параметры.

8. Проведена экономическая оценка эффективности внедрения ЭПДВЧ для реализации технологического процесса десульфуризации сырой нефти на нефтеперерабатывающее производство. Затраты по традиционному методу де-

сульфуризации превышают затраты по внедряемому методу кавитационной обработки в ЭПДВЧ на 75,4 %.

9. Перспективы дальнейшей разработки темы исследований заключается в том, что полученные результаты могут стать основой для расширения сфер применения ЭПДВЧ для реализации технологических процессов обработки различного рода жидких сред.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

1. **Куимов, Д.Н.** Оценка движения вторичной дискретной части в электромеханических активаторах вихревого слоя / **Д.Н. Куимов** // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2016. - № 5 (547). - С.11-15.

2. **Куимов Д.Н.** Электромеханический преобразователь со вторичной дискретной частью в системах обработки нефти и нефтепродуктов / **Д.Н. Куимов, А.В. Павленко, А.А. Белов** // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2017. - №5. - С.39-47.

Публикации в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus

3. **Kuimov, D.N.** Low-sulfur fuel and oil production / **D.N. Kuimov, M.S. Minkin, A.D. Lukyanov** // Materials Science Forum. - 2016. - Т.870. - С.671-676.

4. **Kuimov, D.N.** Influence of control algorithms parameters on an electro-mechanical converter with a secondary discrete part / **D.N. Kuimov, M.S. Minkin** // SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING.- October 2017.- Vol.14. - No. 3. - p. 323-331.

5. **Kuimov, D.N.** The electromechanical converter in the systems of desulfurisation of crude oil / **D.N. Kuimov, M.S. Minkin** // MATEC Web of Conferences 132, 03016 (2017).

Патент РФ на полезную модель

6. Индукционное устройство активации и смешивания жидкой среды: МПК В01F 13/08 (2006.01) / **Куимов Д.Н., Минкин М.С.**; ДГТУ. - № 169608; 0311.2016; 24.03.2017, Бюл. №9. - 7.

Публикации в других изданиях

7. Минкин, М.С. Электромеханическая активация нефти и нефтяных остатков в аппаратах вихревого слоя / М.С. Минкин, **Д.Н. Куимов, М.Н. Кулинич** // В сборнике: Динамика технических систем Сборник трудов XII международной научно-технической конференции. - 2016. - С.392-396.

Вклад автора в результаты работ, опубликованных в соавторстве, состоит в поиске и разработке технического решения по устранению негативного влияния «мертвых» зон 1-го и 2-го порядка; проведении математического моделирования процесса движения единичного ферромагнитного элемента (2); теоретического исследования процесса разрушения сернистых соединений под воздействием гидродинамической кавитации, инициируемой интенсивным движением большой совокупности ферромагнитных элементов (3); разработке

алгоритмов коммутации фаз, обеспечивающих эффективное движение вторичной дискретной части (4); анализе эффективности обработки нефти в устройствах с дискретной вторичной частью (5), поиске эффективной конфигурации индуктора ЭПДВЧ (6), анализе перспективности применения устройства с дискретной вторичной частью для обработки жидких нефтепродуктов (7).

* * * * *

Куимов Денис Николаевич

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ДИСКРЕТНОЙ
ВТОРИЧНОЙ ЧАСТЬЮ В СИСТЕМАХ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ**

Автореферат

Подписано в печать 17.10.2018.

Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 46-0109.

Отпечатано в ИД «Политехник»

346400, г. Новочеркасск, ул. Первомайская, 166

mdp-npi@mail.ru