

*На правах рукописи*



**КОРОСТЕЛЕВА Анна Владимировна**

**ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ВОДЫ  
В НЕФТЕПРОДУКТАХ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ИХ К СЖИГАНИЮ**

**Специальность 03.02.08 – экология (в химии и нефтехимии)**

**А в т о р е ф е р а т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**ПЕНЗА – 2012**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Пензенская государственная технологическая академия” на кафедре “Биотехнологии и технологическая безопасность”.

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
**ТАРАНЦЕВ Константин Валентинович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Автоматизация  
и управление» ФГБОУ ВПО «Пензенская  
государственная технологическая академия»  
**ПРОШИН Иван Александрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующая кафедрой «Промышленная  
экология» ФГБОУ ВПО «Белгородский  
государственный технологический  
университет имени В.Г. Шухова»  
**СВЕРГУЗОВА Светлана Васильевна**

**Ведущая организация:** ОАО «Научно-исследовательский и  
проектно-технологический институт  
химического машиностроения»  
(ОАО «НИИПТхиммаш»), г. Пенза

Защита состоится 21 марта 2012 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета ДМ 212.337.02 при Пензенской государственной технологической академии по адресу: 440039, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, д. 1а/11, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО “Пензенская государственная технологическая академия”.

Автореферат разослан “20” февраля 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Яхкинд Михаил Ильич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** В процессе добычи, переработки и транспортировки нефтепродуктов образуется большое количество нефтесодержащих вод с малым содержанием нефтепродуктов. Такие нефтесодержащие воды в зависимости от технико-экономических возможностей предприятия можно подвергать разделению с повторным использованием компонентов или вводить в топливные темные нефтепродукты (мазут) для последующего сжигания. Первый путь является более ресурсосберегающим, но очень дорог и трудоемок, поэтому для многих предприятий предпочтительно утилизировать нефтесодержащие воды в качестве топлива. Это позволит снизить антропогенное воздействие объектов нефтехимических отраслей промышленности на окружающую среду и более эффективно использовать тяжелые нефтепродукты.

Теоретически и экспериментально доказано, что введение в топливо воды в количестве до 10 % не снижает теплотворной способности топлива, а в ряде случаев даже повышает ее, что позволяет утилизировать нефтесодержащие воды в процессе сжигания темных нефтепродуктов.

Это обуславливает актуальность проведения исследований в области разработки технологии электрогидродинамического диспергирования нефтесодержащих отходов в темных нефтепродуктах на установках получения топливных водонефтяных эмульсий.

Из известных методов получения топливных водонефтяных эмульсий электрогидродинамический метод отличается низким энергопотреблением при достаточной эффективности диспергирования.

Исследованиям в данном направлении посвящены работы Malcher J.R., Иванова В.М., Абдуллина А.И., Батуева С.П., Бирюкова А.Л., Кормилицына В.И., Загаровского В.В., Ефремовой Т.А., Кулагиной Т.А., Шалунова А.В., Таранцева К.В. и др.

Для разработки технологии и выбора оптимальных режимов работы устройств электрогидродинамического диспергирования воды в темных нефтепродуктах для подготовки их к сжиганию необходимо проведение исследований по определению степени влияния гидродинамических и электрофизических параметров процесса и рабочих сред на электродиспергирование, с целью разработки электродиспергаторов (аппаратов для создания эмульсий) и совершенствования методов проектирования технологических систем создания топливных водонефтяных эмульсий.

**Цель работы:** установление закономерностей процесса электрогидродинамического диспергирования воды в темных нефтепродуктах и определение зависимости интенсивности процесса от гидродинамических и электрофизических факторов, с разработкой на их основе технологической схемы создания топливных водонефтяных эмульсий и конструкций электродиспергаторов.

Для достижения данной цели в работе решались следующие задачи:

1. Анализ существующих способов создания топливных водонефтяных эмульсий для выбора эффективного метода интенсификации процесса диспер-

гирования и разработки на его основе инженерных решений по защите окружающей среды.

2. Установление закономерностей процесса электрогидродинамического диспергирования воды в темных нефтепродуктах и определение зависимости интенсивности процесса от гидродинамических и электрофизических факторов.

3. Моделирование процесса электрогидродинамического диспергирования топливных водонефтяных эмульсий, с целью выбора оптимальных инженерных решений по конструктивному оформлению процесса и разработке технологической системы создания топливных водонефтяных эмульсий.

4. Разработка технологической схемы создания топливных водонефтяных эмульсий на основе полученных закономерностей электрогидродинамического диспергирования воды в темных нефтепродуктах.

5. Разработка электродиспергаторов для создания топливных водонефтяных эмульсий с заданными свойствами из темных нефтепродуктов и нефтесодержащих сточных вод.

**Объектом исследования** являются топливные водонефтяные эмульсии на стадии их создания и подготовки к сжиганию.

**Предметом исследования** является электрогидродинамический метод создания топливных водонефтяных эмульсий и инженерные решения на его основе по конструктивному оформлению процесса и технологической системы для его проведения.

**Методы исследования:** в ходе работы над диссертацией был использован системный подход к анализу процессов, происходящих в промышленных аппаратах, проведены натурные испытания и численное моделирование с использованием пакетов MathCAD и COMSOL, регрессионный и факторный анализ.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Установлены зависимости времени разрушения капель воды в темных нефтепродуктах от напряженности электрического поля, диэлектрической проницаемости и электропроводности, размеров капель, вязкости, поверхностного натяжения и плотности рабочих сред.

2. Впервые создана математическая модель процесса разрушения капли воды в нефтепродуктах, учитывающая влияние поляризационных и кулоновских сил, и позволяющая моделировать процесс разрушения капли в зависимости от гидродинамических и электрофизических факторов.

3. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитать поле скоростей, электрическое поле и распределение давления внутри электродиспергатора и учитывающая влияние гидродинамических параметров конструкции и электрофизических свойств контактирующих жидкостей на процесс электродиспергирования воды в темных нефтепродуктах.

**Практическую значимость** работы составляют:

1. Результаты моделирования процесса электрогидродинамического диспергирования топливных водонефтяных эмульсий, позволяющие определять оптимальные технологические режимы электродиспергирования.

2. Технологическая схема создания топливных водонефтяных эмульсий на основе полученных закономерностей электрогидродинамического диспергирования воды в темных нефтепродуктах.

3. Разработанные конструкции электродиспергаторов для создания топливных водонефтяных эмульсий с заданными свойствами из темных нефтепродуктов и нефтесодержащих сточных вод.

4. Практические рекомендации по выбору оптимальных конструкций электродиспергаторов и режимов их эксплуатации.

#### **На защиту выносятся:**

1. Результаты экспериментальных исследований и численного анализа процесса электрогидродинамического диспергирования и устройств для проведения процесса создания топливных водонефтяных эмульсий.

2. Зависимости времени разрушения капель воды в темных нефтепродуктах от напряженности электрического поля, диэлектрической проницаемости и электропроводности, размеров капель, вязкости, поверхностного натяжения и плотности рабочих сред.

3. Математическая модель процесса разрушения капли воды в нефтепродуктах, учитывающая влияние поляризационных и кулоновских сил, и позволяющая моделировать процесс разрушения капли в зависимости от гидродинамических и электрофизических факторов.

4. Математическая модель, позволяющая рассчитать поле скоростей, электрическое поле и распределение давления внутри электродиспергатора и учитывающая влияние гидродинамических параметров конструкции и электрофизических свойств контактирующих жидкостей на процесс электродиспергирования воды в темных нефтепродуктах.

5. Технологическая схема создания топливных водонефтяных эмульсий на основе полученных закономерностей электрогидродинамического диспергирования воды в темных нефтепродуктах.

6. Конструкции электродиспергаторов для создания топливных водонефтяных эмульсий с заданными свойствами из темных нефтепродуктов и нефтесодержащих сточных вод.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы внедрены в ОАО “Средневожский научно-исследовательский институт по нефтепереработке” (г. Новокуйбышевск Самарской области) и ООО “Агентство инженерно-экологического проектирования” (г. Йошкар-Ола), что подтверждено соответствующими актами о внедрении. Теоретические и практические результаты работы используются в учебном процессе Пензенской государственной технологической академии при преподавании дисциплин “Процессы и аппараты защиты окружающей среды”, “Конструирование и расчет природоохранной техники”, “Инженерные методы защиты гидросферы” и “Процессы и аппараты химических производств”.

**Достоверность научных положений, выводов и практических рекомендаций,** сформулированных в диссертации, обеспечивается использовани-

ем современных методов исследования, адекватных предмету, цели и задачам работы, результатами практического использования предложенных в диссертации методов и устройств, актами об использовании и внедрении результатов работы, а также апробацией работы на международных конференциях.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на второй Всероссийской студенческой научно-технической конференции “Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология” (2008 г., Казань); международном симпозиуме “Новые технологии в образовании, науке и экономике” (2009 г., Сингапур); II Всероссийской научно-практической конференции “Безопасность в чрезвычайных ситуациях” (2010 г., Санкт-Петербург); I, II и IV Международной научно-практической конференции “Молодёжь. Наука. Инновации” (2010–2011 гг., Пенза).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, из них четыре – в журналах, входящих в перечень ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка используемой литературы из 147 наименований, приложений. Основное содержание диссертации включает 123 страницы текста, 24 рисунка, 10 таблиц.

**Благодарность.** Автор и научный руководитель выражают благодарность Стишкову Юрию Константиновичу, доктору физико-математических наук, профессору физического факультета, заведующему лабораторией электрогидродинамики Научно-исследовательского института радиопизики Санкт-Петербургского государственного университета и его сотрудникам за консультации в процессе создания математических моделей и предоставленную возможность проведения расчетов в среде COMSOL.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель работы, поставлены задачи, решение которых позволяет достичь цели исследования, определены новизна и практическая значимость результатов исследования.

**В первом разделе** рассмотрены виды нефтесодержащих отходов, способы их переработки и механизм диспергирования.

Проанализированы виды и свойства водонефтяных эмульсий, методы их получения. Показано, что из большого числа известных методов получения эмульсий электрогидродинамический отличается малыми затратами энергии для проведения процесса, а следовательно, и малыми эксплуатационными затратами.

На процесс создания топливных водонефтяных эмульсий в электрическом поле влияют гидродинамические и электрофизические свойства жидкостей, составляющих эмульсию. Для оптимизации данного процесса и разработки инженерных решений по защите окружающей среды необходимо исследовать влияние различных гидродинамических и электрофизических параметров на процесс электрогидродинамического диспергирования.

Показано, что существующая в настоящее время система разработки промышленных аппаратов включает в себя вначале накопление эмпирических данных с целью выяснения физико-химической сущности процесса, затем создание лабораторной, далее пилотной и полупромышленной установки, и затем промышленного образца. Большое количество этапов при разработке промышленных аппаратов, необходимость корректировки математических моделей в зависимости от масштаба, наличие в этих моделях большого числа эмпирических коэффициентов, определяемых экспериментально или методом гидродинамического моделирования, существенно увеличивают затраты, сроки проектирования и модернизации аппаратов. Кроме того, существующая практика расчетов не всегда позволяет учитывать изменения параметров входных потоков (состава, свойств и др.), а также непостоянство технологических режимов в промышленных аппаратах, являющихся причиной снижения их мощности и эффективности. Поэтому при такой технологии проектирования выбранные решения зачастую не оптимальны.

В связи с этим, разработку конструкции и технологии целесообразно проводить в лабораторных условиях (на макетах), а для перехода к промышленному аппарату применять методы математического моделирования. Это позволит на стадии предпроектной разработки определять оптимальные конструкции промышленных аппаратов, обеспечивающих необходимую эффективность процесса при вариации параметров входных потоков и технологических режимов.

С этой целью в работе проводилось физическое и математическое моделирование процесса электрогидродинамического диспергирования.

Физическому моделированию процесса электрогидродинамического диспергирования посвящен второй раздел, математическому моделированию процесса – третий раздел, моделированию конструкции электродиспергатора – четвертый раздел.

**Во втором разделе** рассмотрены физические основы процесса электрогидродинамического диспергирования, дано описание экспериментальной установки, методики проведения экспериментов, приведены результаты исследования.

Исследования процесса электрогидродинамического диспергирования проводились в зависимости от напряженности электрического поля; размеров капель; поверхностного натяжения; диэлектрической проницаемости; вязкости; плотности рабочих сред.

Основная цель исследований состояла в получении данных, позволяющих оценить степень влияния гидродинамических параметров и электрофизических свойств на время разрушения капель воды в нефтепродуктах.

В качестве основного критерия оптимизации было выбрано время разрушения капель воды в нефтепродуктах, так как оно позволяет комплексно оценить интенсивность протекающих процессов и эффективность работы оборудования.

Экспериментальные исследования проводились на установке, состоящей из электрической и оптической схемы (рисунок 1).

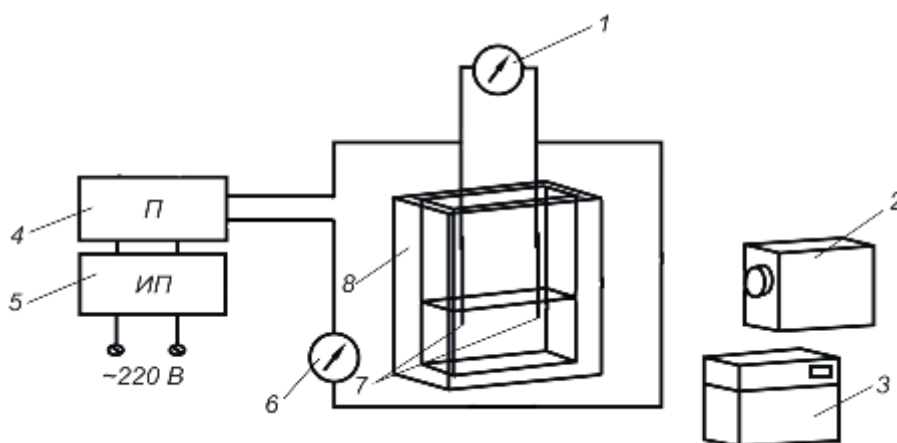


Рисунок 1 – Экспериментальная установка:

1 – микроамперметр; 2 – источник света; 3 – фотоаппарат; 4 – преобразователь высокого напряжения; 5 – источник питания; 6 – киловольтметр; 7 – электроды; 8 – кювета

Электрическая схема позволяла создавать разность потенциалов между электродами, расположенными в стеклянной кювете, от 0 до 20 кВ с помощью высоковольтного преобразователя “Разряд 1”. Управление его выходным напряжением осуществлялось регулированием входного напряжения от 0 до 12 В. Прямоугольная кювета размером 70x65x30 мм была склеена из зеркального стекла толщиной 5 мм. В кювете закреплялись плоские медные электроды размером 30x70 мм.

Оптическая схема была предназначена для регистрации происходящих процессов и состояла из системы освещения и фото-киноаппаратуры.

Поскольку нефть и вода в чистом виде являются диэлектриками, и проводимость их сильно колеблется в зависимости от содержания в них различных веществ, а электропроводность нефтяных эмульсий обуславливается не только количеством содержащейся воды и степенью ее дисперсности, но и количеством растворенных в этой воде солей и кислот, эксперименты проводились на модельных средах со свойствами, имитирующими водонефтяные эмульсии (таблица 1).

Таблица 1 – Физико-химические свойства модельных сред при температуре 20 °С

Жидкость	Электропроводность $\sigma$ , $(\text{Ом}\times\text{см})^{-1}$	Относительная диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon$	Плотность $\gamma$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Динамическая вязкость $\eta$ , $\text{мПа}\cdot\text{с}$
Вода	$1,5 \cdot 10^{-5}$	80,08	1000	1,01
Касторовое масло	$4,0 \cdot 10^{-11}$	4,50	951	1252,16
Трансформаторное масло	$5,0 \cdot 10^{-14}$	2,20	881	21,71
Нефть	$1,0 \cdot 10^{-10}$	2,2	884	474



Были проведены эксперименты, позволившие выявить диапазон напряженностей электрического поля, в котором наблюдается явление разрушения капли под действием сил электрического поля.

Результаты эксперимента для процесса разрушения капель воды диаметром от 1 мм до 8 мм в касторовом масле в электрическом поле различной напряженности представлены на рисунке 2. В данном случае, выбор касторового масла был обусловлен тем, что касторовое масло в отличие от темных нефтепродуктов прозрачно, кроме того, его большая вязкость, а, следовательно, малая скорость осаждения капель воды, позволяют проследить и зарегистрировать различные электрогидродинамические течения вблизи капли, процесс ее деформации, а затем разрушения в электрическом поле.

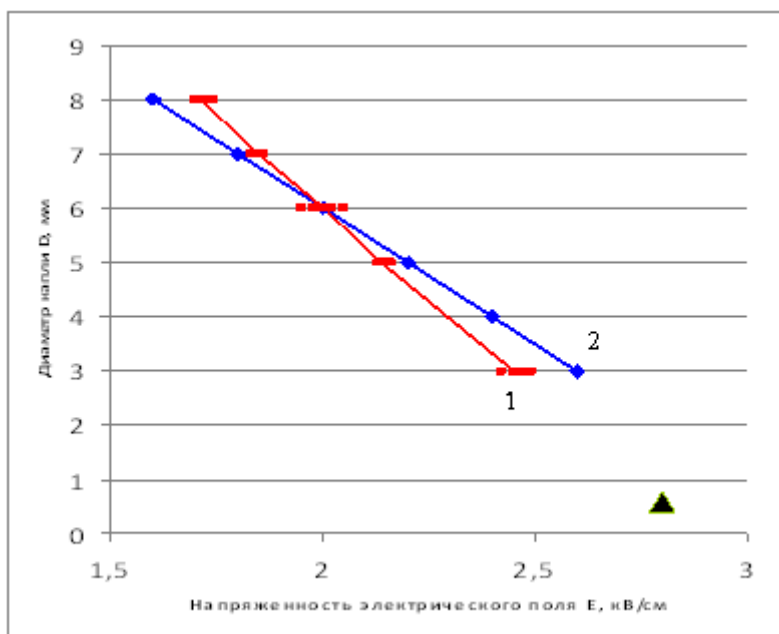


Рисунок 2 – Влияние диаметра капли на критическое напряжение начала ее разрушения в электрическом поле: 1 – эксперимент; 2 – результаты расчета

Из представленных результатов видно, что с уменьшением размера капель воды напряженность поля, необходимая для их разрушения, увеличивается, следовательно, в процессе электродиспергирования, по мере уменьшения размеров капель в рабочей зоне аппарата, необходимо увеличивать напряженность электрического поля.

Полученные результаты исследования согласуются с результатами С. Торза, Р. Кокса, С. Мейсона, полученными при разрушении капли воды в касторовом масле, В.Г. Беньковского, при диспергировании воды в нефти, и Г.М. Панченкова, при электрическом диспергировании водяных капель, взвешенных в углеводородах.

**В третьем разделе** рассмотрены численные методы расчета потенциала электрического поля, создаваемого между плоскими электродами, с последующим определением распределения напряженности электрического поля с помощью программы MathCAD. Произведенный расчет был первым шагом при со-

здании модели сложного мультифизического процесса, описываемого с помощью законов гидродинамики многофазных систем и электродинамики.

Моделирование процессов разрушения капель воды в слабопроводящих жидкостях в пакете COMSOL проведено на основании уравнений Навье–Стокса и неразрывности потока, описывающих течение несжимаемой жидкости между электродами:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + \eta(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F_{st} + \rho g + F_1 + F_2 \\ \nabla \cdot u = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $u$  – скорость потока (м/с);  $\rho$  – плотность (кг/м<sup>3</sup>);  $\eta$  – динамическая вязкость (Па·с);  $p$  – давление (Па);  $g$  – ускорение свободного падения (м/с<sup>2</sup>);  $F_{st}$  – силы поверхностного натяжения (Н/м<sup>3</sup>);  $F_1$  и  $F_2$  – дополнительные поляризационная и кулоновская силы в объеме (Н/м<sup>3</sup>).

Для отслеживания движения фаз на границе раздела касторовое масло – вода использована система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \cdot \nabla \varphi = \nabla \cdot \frac{3\chi\sigma\varepsilon}{2\sqrt{2}} \nabla \psi \\ \psi = -\nabla \cdot \varepsilon^2 \nabla \varphi + (\varphi^2 - 1)\varphi \end{cases}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения (Н/м);  $\varepsilon$  – числовой параметр (м), который определяет толщину границы раздела между жидкостями, то есть область, где фазовая переменная  $\varphi$  изменяется от  $-1$  (вода) до  $+1$  (касторовое масло);  $\chi$  – числовой параметр, характеризующий подвижность границы раздела.

Электрический потенциал  $V$  рассчитывали как:

$$-\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V) = 0, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная вакуума;  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Электрическую поляризационную силу, входящую в уравнение Навье–Стокса, определяли дивергенцией тензора напряжений Максвелла

$$F_1 = \nabla \cdot T. \quad (4)$$

Тензор напряжений Максвелла  $T$  определяли по формуле:

$$T = ED^T - \frac{1}{2}(E \cdot T)I, \quad (5)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля (В/м);  $D$  – электрическая индукция поля:

$$E = -\nabla \cdot V, \quad (6)$$

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E. \quad (7)$$

В двумерных моделях, рассчитанных в ходе математического эксперимента, тензор Максвелла определялся в следующем виде:

$$T = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \varepsilon_r E_x^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r (E_x^2 + E_y^2) & \varepsilon_0 \varepsilon_r E_x E_y \\ \varepsilon_0 \varepsilon_r E_y E_x & \varepsilon_0 \varepsilon_r E_y^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r (E_x^2 + E_y^2) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Относительную диэлектрическую проницаемость определяли в зависимости от внутренних объемных долей каждой жидкости:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r1} Vf1 + \varepsilon_{r2} Vf2, \quad (9)$$

здесь  $\varepsilon_{r1}$  и  $\varepsilon_{r2}$  – относительные диэлектрические проницаемости касторового масла и воды соответственно;  $Vf1$  – объемная доля первой жидкости (вода);  $Vf2$  – объемная доля второй жидкости (касторовое масло).

Электрическую кулоновскую силу, входящую в уравнение Навье–Стокса, определяли как

$$F_2 = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{\sigma_\varepsilon} \nabla \sigma_\varepsilon. \quad (10)$$

Электропроводность определяли в зависимости от внутренних объемных долей каждой жидкости:

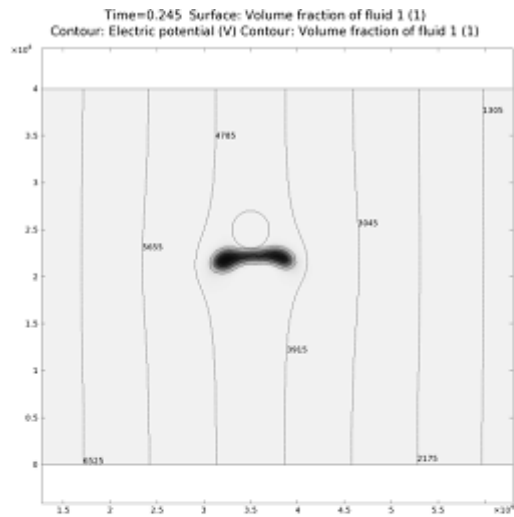
$$\sigma_\varepsilon = \sigma_{\varepsilon1} Vf1 + \sigma_{\varepsilon2} Vf2, \quad (11)$$

где  $\sigma_{\varepsilon1}$  и  $\sigma_{\varepsilon2}$  – электропроводность касторового масла и воды соответственно.

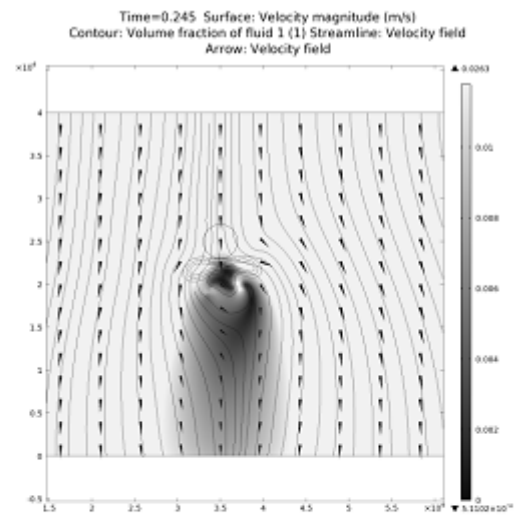
На рисунках 3–4 представлены результаты численного моделирования процесса разрушения капель воды различной электропроводности (солености) в касторовом масле под воздействием электрического поля. Моделирование проведено для капель воды диаметром 4 мм в межэлектродном пространстве размером 70x40 мм, заполненном касторовым маслом с электропроводностью  $3 \cdot 10^{-4}$  (рисунок 3) и  $1 \cdot 10^{-3}$  (Ом·см)<sup>-1</sup> (рисунок 4).

Исследования показали, что механизм разрушения капли зависит не только от ее размеров, но и в существенной мере от гидродинамических, электрофизических свойств жидкостей, образующих эмульсию.

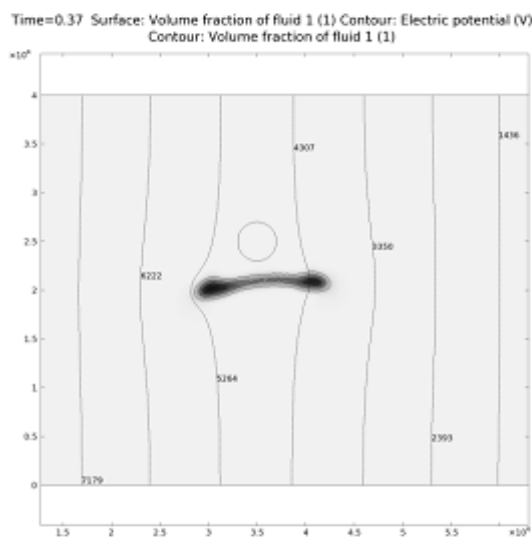
Проанализировав графики, представленные на рисунке 5, можно сделать вывод, что увеличение поверхностного натяжения на границе раздела, вязкости слабопроводящей среды и электропроводности слабопроводящей среды, при прочих равных условиях, вызывает рост времени, необходимого на разрушение капли. Увеличение диэлектрической проницаемости слабопроводящей среды и электропроводности воды, вызывает обратный эффект – уменьшение времени, необходимого на разрушение капли. При увеличении плотности слабопроводящей модельной жидкости время на разрушение капли не меняется. С увеличением плотности слабопроводящей модельной жидкости при напряженности электрического поля 3 кВ/см и при напряженности 4 кВ/см время на разрушение капли не меняется, в остальных случаях уменьшение напряженности электрического поля с 4 кВ/см до 3 кВ/см приводит к интенсификации (ускорению) процесса.



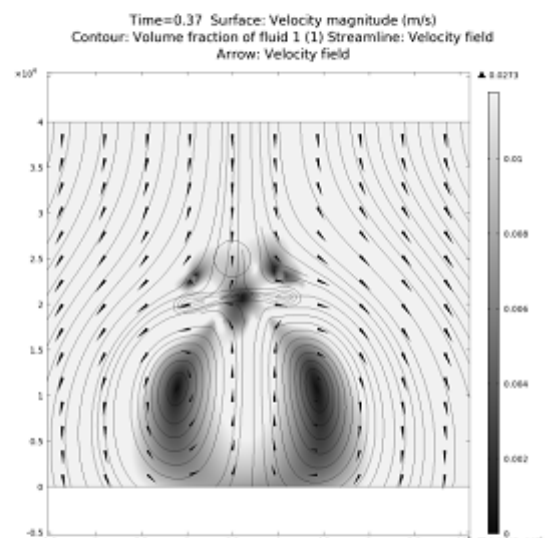
а



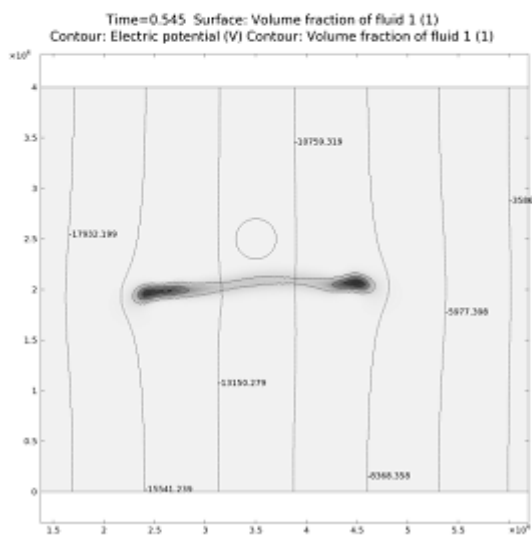
б



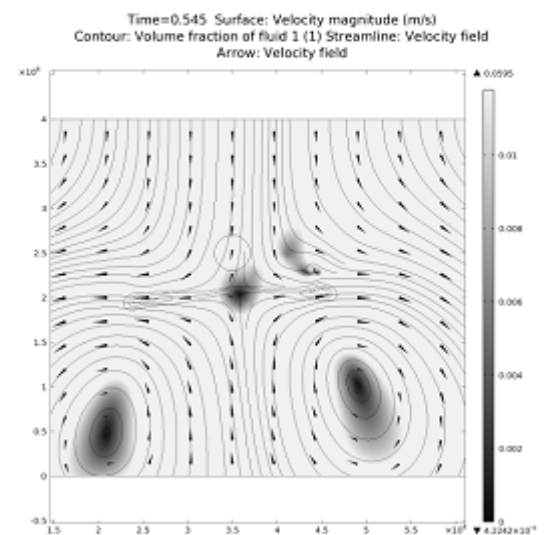
в



г

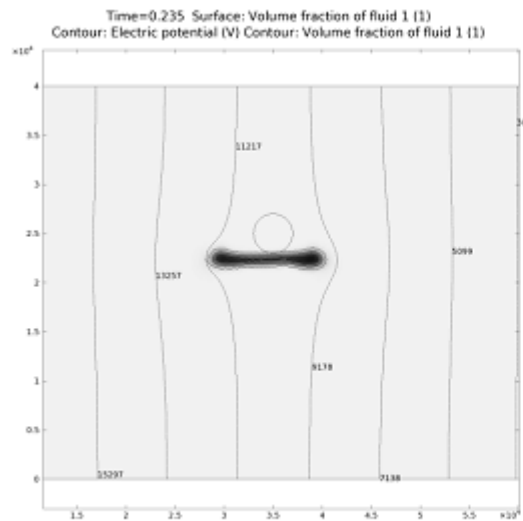


д

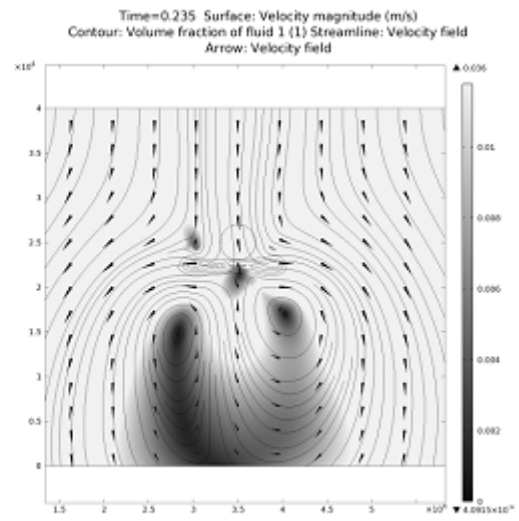


е

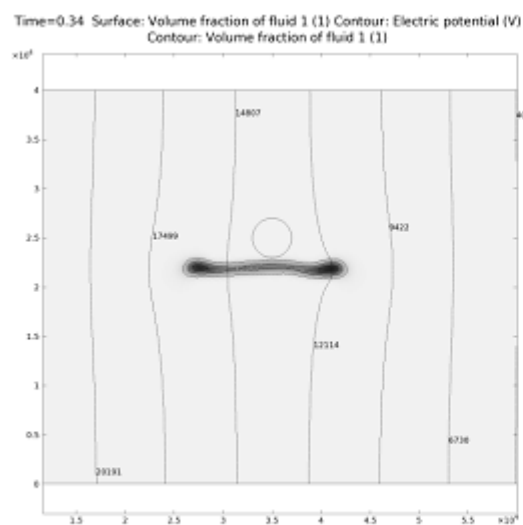
Рисунок 3 – Результаты численного моделирования процесса разрушения каплей воды с электропроводностью  $3 \cdot 10^{-4} \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}$  в касторовом масле, разность потенциалов между электродами 4 кВ/см, исходный диаметр капли 4 мм: а) электрическое поле для 0,245 с; б) поле скоростей для 0,245 с; в) электрическое поле для 0,37 с; г) поле скоростей для 0,37 с; д) электрическое поле для 0,545 с; е) поле скоростей для 0,545 с



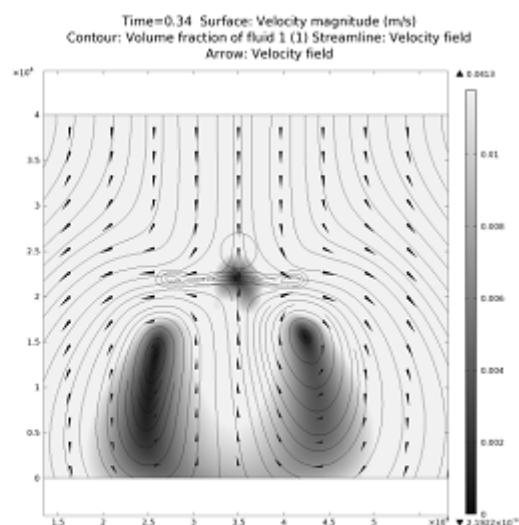
а



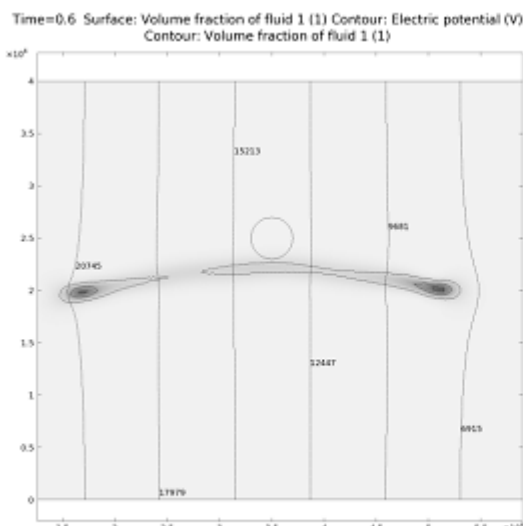
б



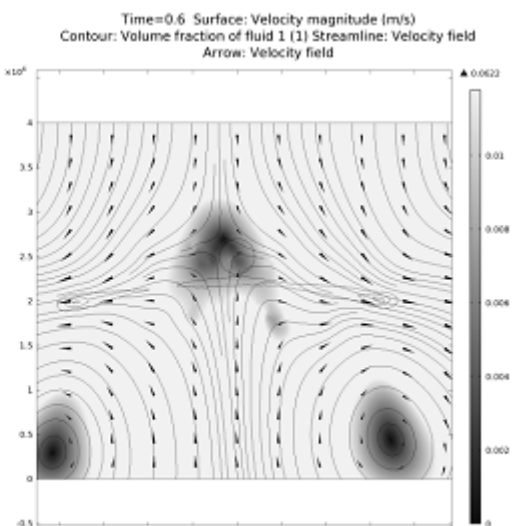
в



г

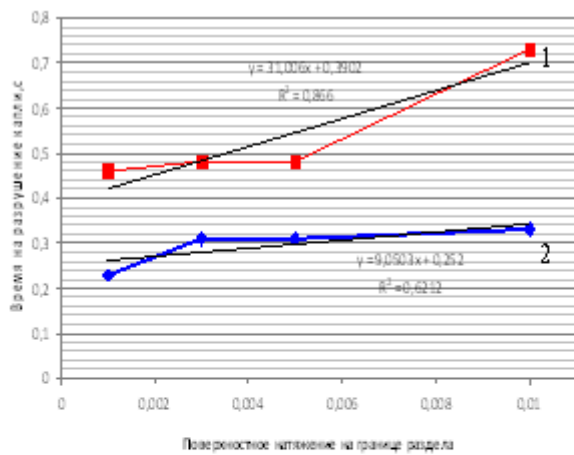


д

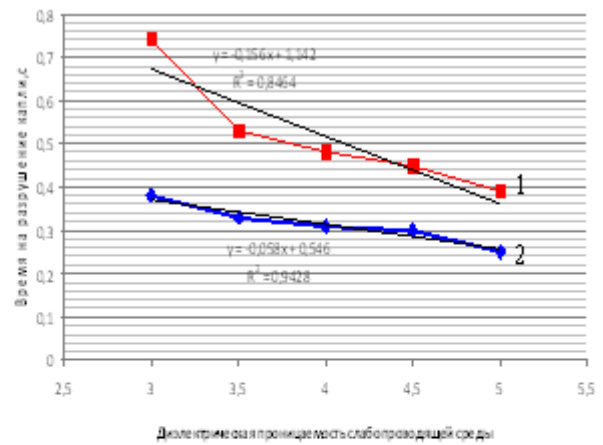


е

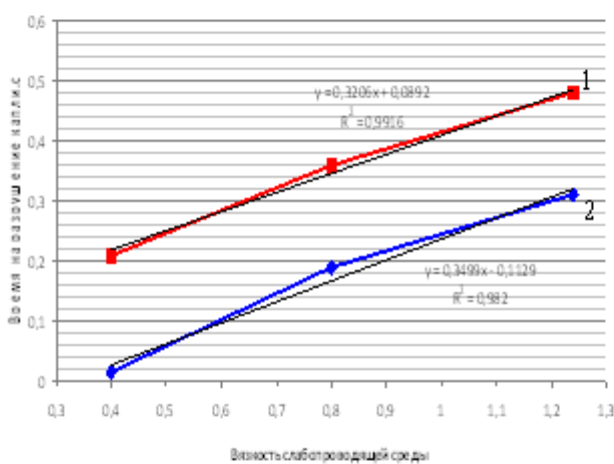
Рисунок 4 – Результаты численного моделирования процесса разрушения каплей воды с электропроводностью  $1 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}$  в касторовом масле, разность потенциалов между электродами 4 кВ/см, исходный диаметр капли 4 мм: а) электрическое поле для 0,245 с; б) поле скоростей для 0,245 с; в) электрическое поле для 0,37 с; г) поле скоростей для 0,37 с; д) электрическое поле для 0,545 с; е) поле скоростей для 0,545 с



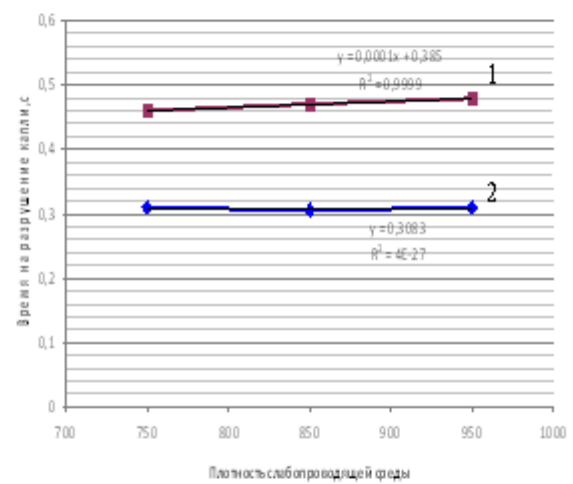
а



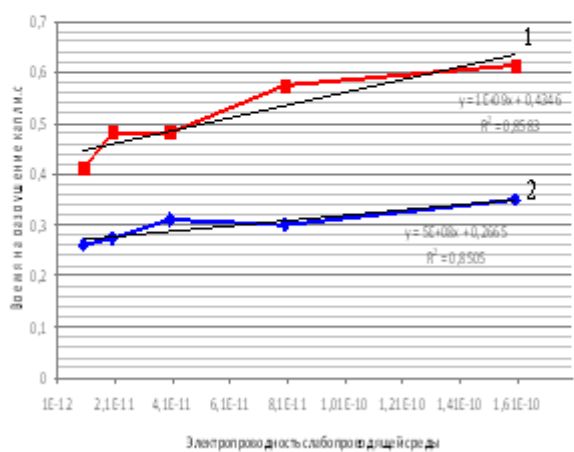
б



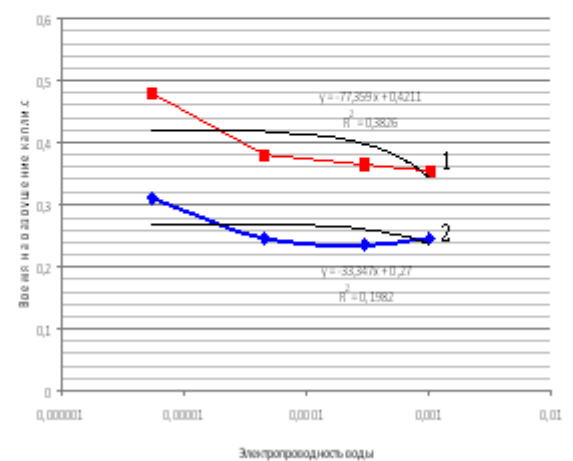
в



г



д



е

Рисунок 5 – Влияние различных факторов на время разрушения капли при напряженности переменного электрического поля 3 кВ/см (1) и 4 кВ/см (2): а) поверхностного натяжения на границе раздела; б) диэлектрической проницаемости слабопроводящей среды; в) вязкости слабопроводящей среды; г) плотности слабопроводящей среды; д) электропроводности слабопроводящей среды; е) электропроводности воды

По результатам теоретических исследований и однофакторных экспериментов выделили четыре основных фактора, влияющие на процесс разрушения капли в электрическом поле, реализованных в четырехфакторном двухуровневом эксперименте, на основании которого была получена регрессионная зависимость между временем разрушения капли и следующими параметрами: поверхностное натяжение на границе раздела жидкости ( $x_1$ ), диэлектрическая проницаемость ( $x_2$ ) и вязкость слабопроводящей среды ( $x_3$ ), напряженность ( $x_4$ ) электрического поля:

$$y = 0,340208 - 0,03229x_1 - 0,02271x_2 + 0,116042x_3 - 0,03896x_4 - 0,02979x_1x_3 + 0,013958x_1x_4 - 0,02021x_2x_3 + 0,020208x_2x_4 - 0,04479x_3x_4 - 0,04646x_1x_2x_4 - 0,02646x_1x_2x_3x_4.$$

Выявлено, что наибольшее влияние на изменение времени разрушения капли оказывает вязкость слабопроводящей среды.

Таким образом, в результате проведенных исследований были получены зависимости времени диспергирования капли от поверхностного натяжения на границе раздела, диэлектрической проницаемости, вязкости, плотности, электропроводности слабопроводящей среды и электропроводности воды на время разрушения капли при напряженности переменного электрического поля. Эти результаты необходимы для анализа протекающих процессов при электродиспергировании и последующей разработке технологии электрогидродинамического диспергирования.

**В четвертом разделе** представлены результаты разработки технологии электрогидродинамического диспергирования, учитывающие выводы, сделанные в предыдущих главах.

Выбор и расчет режимов электрогидродинамического диспергирования осуществлялся с учетом следующих критериев: гидродинамических и электрофизических свойств жидкостей, образующих эмульсию, электрических параметров системы (напряжения, силы тока, полярности электродов, частоты).

После анализа большого числа возможных методов диспергирования, для реализации процесса электрогидродинамического диспергирования были выбраны смесители эжекторного типа с дополнительной системой электродов, подобных трубе Вентури. Эжекторные смесители позволяют создавать и регулировать электрическое поле, а гидродинамические условия в этих аппаратах благоприятны для организации процесса электрогидродинамического диспергирования. Кроме того, эжекторные смесители отличаются простотой в изготовлении, и в них отсутствуют подвижные элементы.

Смеситель эжекторного типа, в котором использовано электрогидродинамическое диспергирование, представлен на рисунке 6. Электрическое поле создается между стержневым электродом, расположенным по оси трубы Вентури, и заземленным корпусом электродиспергатора.

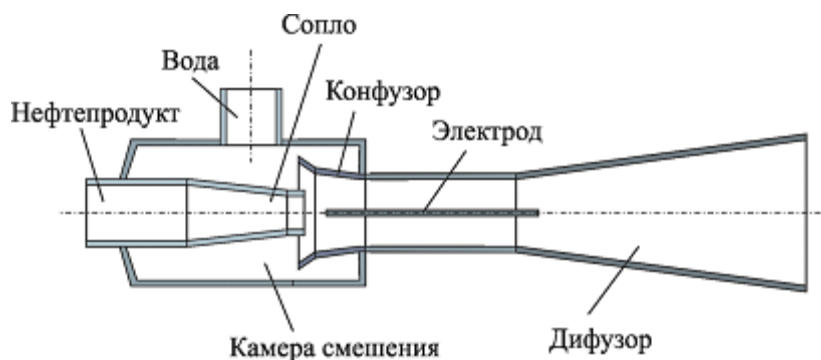


Рисунок 6 – Конструкция смесителя эжекторного типа для электрогидродинамического диспергирования

Для выбора формы и размеров эжекторного смесителя были созданы и рассчитаны трехмерные модели, учитывающие вторичные течения и вихреобразования, возникающие в рабочей зоне в процессе смешения темных нефтепродуктов (мазотов) с водой (рисунок 7).

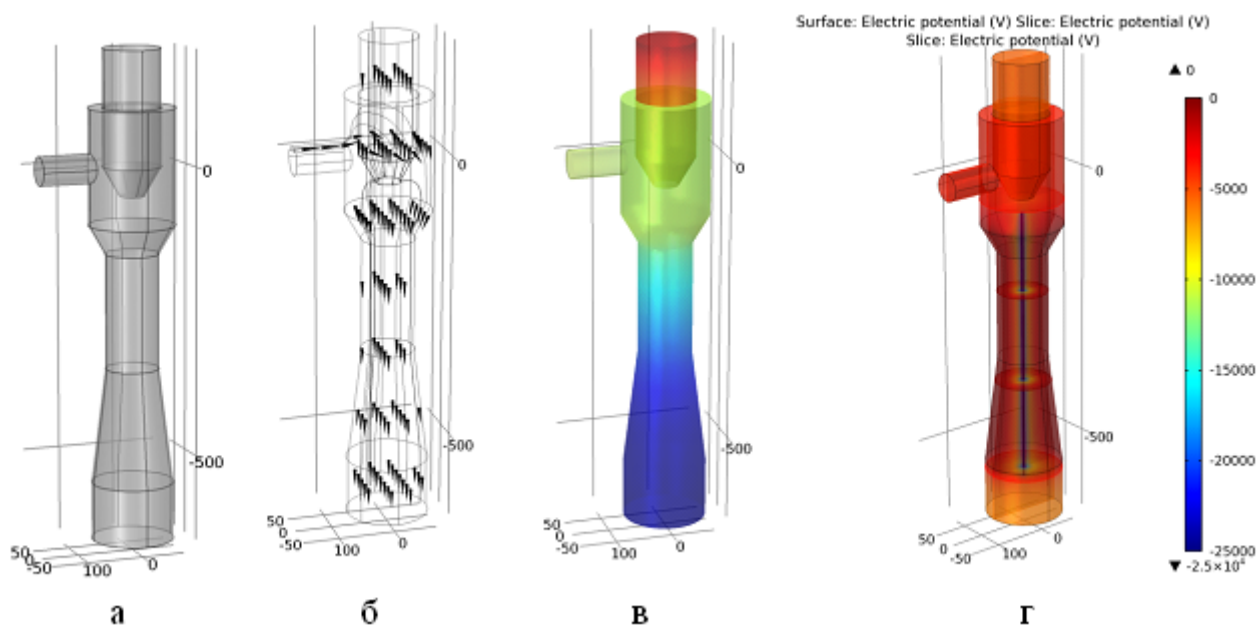


Рисунок 7 – Результаты моделирования смесителя эжекторного типа: а) трехмерная модель; б) поле скорости течения жидкости; в) распределение давления; г) распределения потенциала электрического поля

Данные модели позволили оценить структуру потоков и распределение давления по объему при изменении формы и размеров эжекторных смесителей и выбрать рациональную конструкцию.

Для анализа характера распределения напряженности электрического поля в рабочей зоне электрогидродинамического диспергатора была создана трехмерная модель с использованием электростатического модуля COMSOL. На рисунке 7 представлены результаты моделирования распределения потенциала электрического поля в предлагаемом электрогидродинамическом диспергаторе.



Для создания благоприятных гидродинамических условий в аппарате, исключения застойных зон и вихреобразования были исследованы различные формы и размеры диспергаторов, а также различные скорости подачи рабочих жидкостей. Кроме того, исследованы различные способы организации потоков в аппарате, и различные давления на линиях подачи жидкостей и вывода продуктов (рисунок 8).

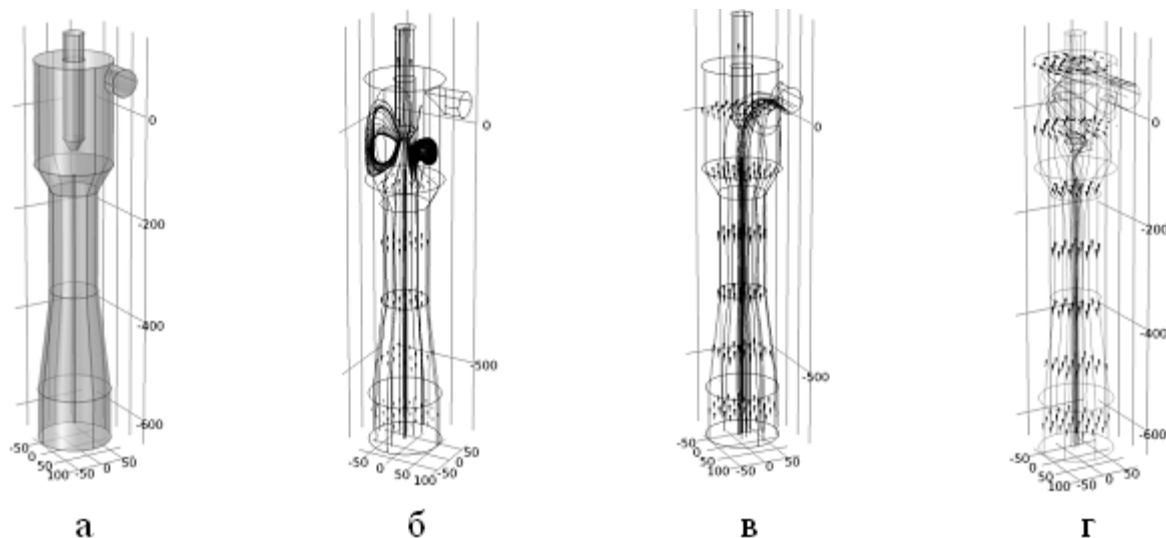


Рисунок 8 – Результаты моделирования смесителя эжекторного типа для различных способов подачи воды в темные нефтепродукты:  
а) смеситель эжекторного типа; б) через центральный штуцер;  
в) через смещенный от оси ввод воды при скорости 0,1 м/с; г) структура потока формирующаяся при увеличении скорости потока инжектируемого потока до 5 м/с

Исследования показали, что использование смещенного штуцера для подачи воды не целесообразно, так как из-за большой вязкости нефтепродукта, возникающие центробежные силы недостаточны для существенного изменения структуры потоков в аппарате. Поэтому дальнейшие исследования проводились на эжекторных смесителях с несмещенным штуцером для подачи воды в эжекторный электродиспергатор.

Результаты исследований позволили выбрать оптимальные режимы в электрогидродинамическом смесителе эжекторного типа для ввода воды в темные нефтепродукты при приготовлении топливных эмульсий (рисунок 9). Данная конструкция рассчитана на производительность по тяжелому продукту 170 кубических метров в час и подачу воды 5 кубометров в час.

Таким образом, предложенные модели позволяют оценить время пребывания эмульсии в рабочей зоне, рассчитать длину рабочей зоны, достаточную для завершения процесса образования тонкодисперсной эмульсии. После прохождения электродиспергатора полученную эмульсию необходимо сразу направить в форсунку, так как в процессе электрогидродинамического диспергирования происходит разрушение адсорбционных слоев на границе раздела и эмульсия быстро расслаивается. Технологическая схема узла подготовки топлива к сжиганию представлена на рисунке 10.

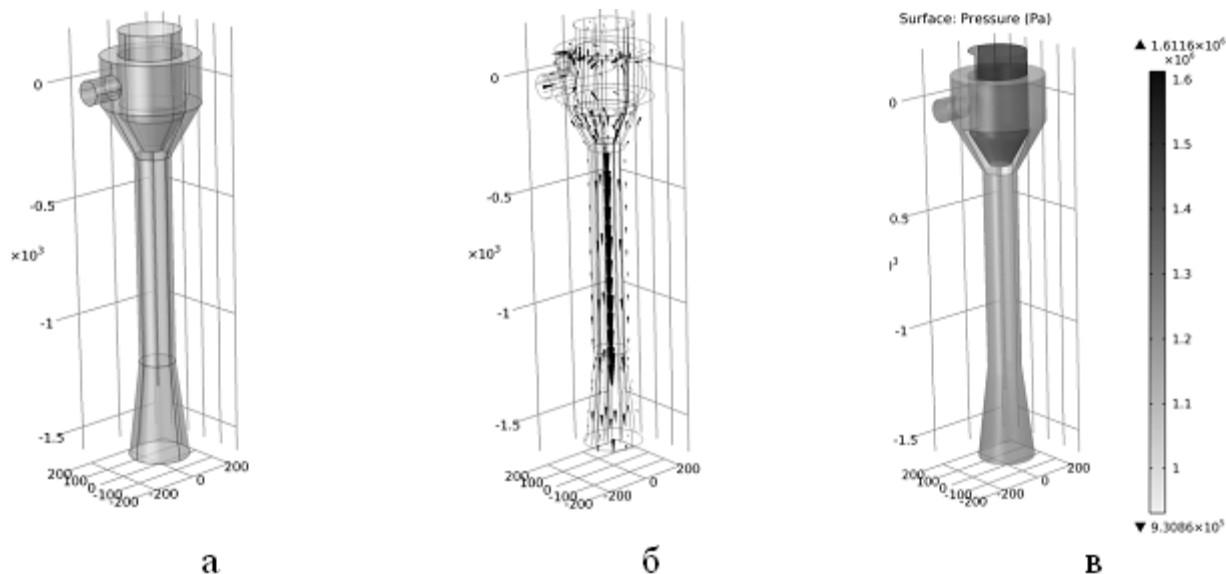


Рисунок 9 – Результаты моделирования для рекомендованного эжекторного смесителя: а) трехмерная модель; б) поле скорости течения жидкости; в) распределение давления

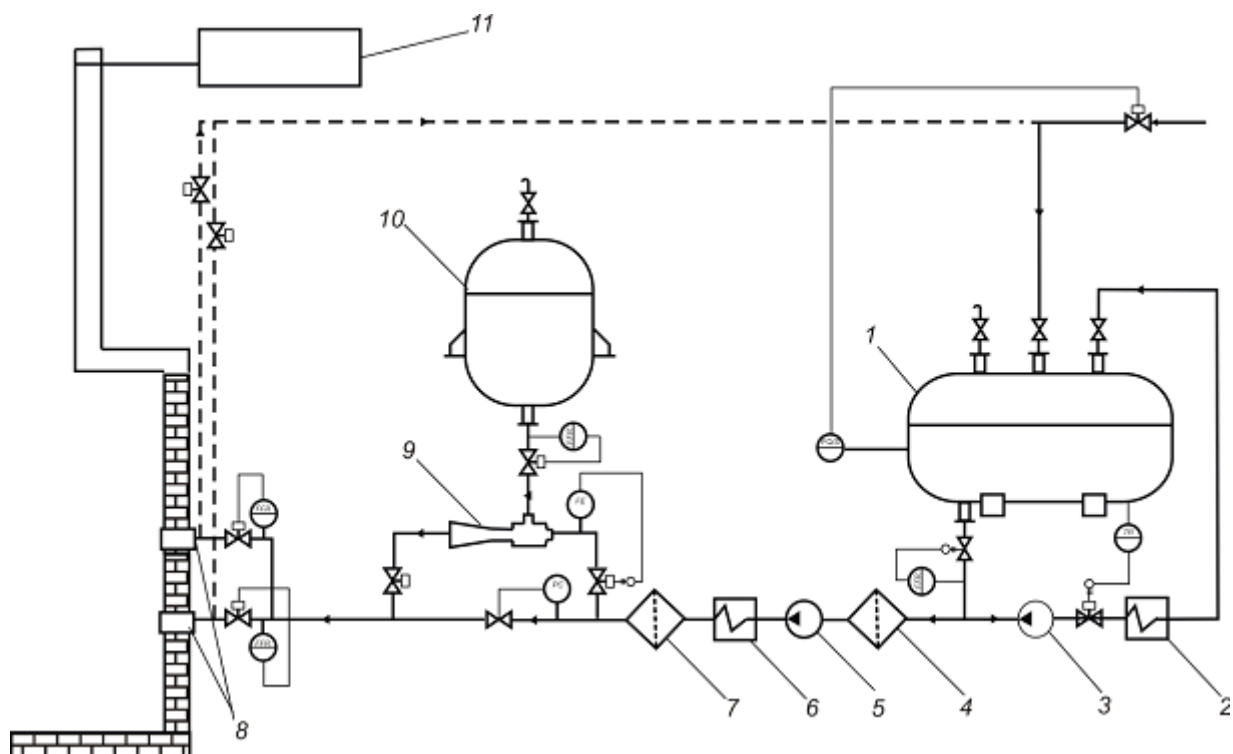


Рисунок 10 – Схема мазутного хозяйства котельных при подготовке мазута к сжиганию: 1 – резервуар; 2 – подогреватель мазута циркуляционного контура; 3 – циркуляционный насос; 4 – фильтры грубой очистки; 5 – подающий мазутный насос; 6 – подогреватель мазута; 7 – фильтр тонкой очистки; 8 – форсунки котла; 9 – электрогидродинамический диспергатор; 10 – емкость для воды; 11 – модуль экологического мониторинга и контроля

**В приложениях А, Б, В** приведены акты внедрения результатов исследования. В приложении А приведен акт внедрения результатов диссертационной работы в ОАО “Средневожский научно-исследовательский институт по нефтепереработке”, г. Новокуйбышевск Самарской области. В приложении Б приведен акт внедрения результатов диссертационной работы в ООО “Агентство инженерно-экологического проектирования”, г. Йошкар-Ола. В приложении В – акт внедрения результатов исследования в учебный процесс при подготовке специалистов по направлениям 280202.65 “Инженерная защита окружающей среды” по дисциплинам “Процессы и аппараты защиты окружающей среды”, “Конструирование и расчет природоохранной техники”, “Инженерные методы защиты гидросферы” и 240901.65 – “Биотехнология” по дисциплине “Процессы и аппараты химической технологии”.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Проведен анализ методов диспергирования и устройств для проведения процесса создания топливных водонефтяных эмульсий, по результатам которого выбраны метод электродиспергирования и смеситель эжекторного типа в качестве базового варианта.

2. Установлены зависимости времени разрушения капель воды в темных нефтепродуктах от напряженности электрического поля, диэлектрической проницаемости и электропроводности, размеров капель, вязкости, поверхностного натяжения и плотности рабочих сред.

3. Впервые создана математическая модель процесса разрушения капли воды в нефтепродуктах, учитывающая влияние поляризационных и кулоновских сил, и позволяющая моделировать процесс разрушения капли в зависимости от гидродинамических и электрофизических факторов.

4. Выявлено, что увеличение поверхностного натяжения на границе раздела, вязкости слабопроводящей среды и электропроводности слабопроводящей среды, при прочих равных условиях, вызывает рост времени, необходимого на разрушение капли. Увеличение диэлектрической проницаемости слабопроводящей среды и электропроводности воды вызывает обратный эффект – уменьшение времени, необходимого на разрушение капли. При увеличении плотности слабопроводящей модельной жидкости, время на разрушение капли не меняется. С увеличением плотности слабопроводящей модельной жидкости при напряженности электрического поля 3 кВ/см и при напряженности 4 кВ/см время на разрушение капли не меняется, в остальных случаях уменьшение напряженности электрического поля с 4 кВ/см до 3 кВ/см приводит к интенсификации процесса.

5. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитать поле скоростей, электрическое поле и распределение давления внутри электродиспергатора и учитывающая влияние гидродинамических параметров конструкции и электрофизических свойств контактирующих жидкостей на процесс электродиспергирования воды в темных нефтепродуктах. Результаты моделирования

процесса электрогидродинамического диспергирования топливных водонефтяных эмульсий позволяют определить оптимальные технологические режимы электродиспергирования.

6. Предложена технологическая схема создания топливных водонефтяных эмульсий на основе полученных закономерностей электрогидродинамического диспергирования воды в темных нефтепродуктах.

7. Разработаны конструкции электродиспергаторов для создания топливных водонефтяных эмульсий с заданными свойствами из темных нефтепродуктов и нефтесодержащих сточных вод, позволяющие проводить процесс при малых затратах с наибольшей эффективностью.

8. Даны практические рекомендации по выбору конструкций электродиспергаторов для создания топливных эмульсий из жидкостей с заданными физико-химическими свойствами и режимов их эксплуатации.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В журналах перечня ВАК**

1. Таранцев К.В., Коростелева А.В. Исследование процесса разрушения капель воды в слабопроводящих жидкостях под воздействием электрического поля // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В.Г. Белинского. Серия Физико-математические и технические науки. 2011. № 26. С. 666–671.

2. Таранцев К.В., Красная Е.Г., Коростелева А.В. Расчет распределения напряженности в межэлектродном пространстве электрогидродинамических устройств численными методами // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В.Г. Белинского. Серия Физико-математические и технические науки. 2011. № 26. С. 654–660.

3. Таранцев К.В., Красная Е.Г., Коростелева А.В. Моделирование процессов в межэлектродном пространстве электрогидродинамических устройств // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В.Г. Белинского. Серия Физико-математические и технические науки. 2011. № 26. С. 661–665.

4. Таранцева К.Р., Красная Е.Г., Лебедев Е.Л., Коростелева А.В. Анализ техногенного воздействия промышленных предприятий г. Пензы на гидросферу // Экология и промышленность России. 2010. № 12. С. 40–45.

### **Публикации в других изданиях**

6. Коростелева А.В. Анализ техногенной нагрузки магистральных трубопроводов на примере Пензенского ЛПУМГ // Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология: Сборник статей второй Всероссийской студенческой научно-технической конференции. Казань: Изд-во Казанского государственного технологического университета, 2008. С. 294–297.

7. Казаков В.А., Коростелева А.В. Анализ техногенной нагрузки магистральных трубопроводов на примере Пензенского ЛПУ МГ ООО “Волготрансгаз” // Новые технологии в образовании, науке и экономике: Труды XXIV Международного Симпозиума. Сингапур: Информационно-издательский центр Фонда поддержки вузов, 2009. С. 172–176.

8. Коростелева А.В., Мызников А.О., Таранцев К.В., Колмогуров П.А. Модернизация очистных сооружений г. Заречный с целью повышения эффективности их работы // Молодежь. Наука. Инновации: Труды I Международной научно-практической Интернет конференции. Пенза: Изд-во Пензенского филиала РГУИТП, 2010. С. 139-142.

9. Лебедев Е.Л., Коростелева А.В., Дегтева Ю.Г. Количественный анализ качественного состояния экологической системы // Безопасность в чрезвычайных ситуациях: Сборник научных трудов II Всероссийской научно-практической конференции. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2010. С. 16–20.

10. Коростелева А.В., Красная Е.Г., Таранцев К.В. Влияние неоднородности электрического поля на интенсивность обезвоживания нефти // Молодежь. Наука. Инновации: Труды II Международной научно-практической Интернет конференции. Пенза: Изд-во Пензенского филиала РГУИТП, 2010. С. 287–292.

11. Коростелева А.В., Красная Е.Г., Таранцев К.В. Применение выносных электрокоалесценторов для обезвоживания нефти // Молодежь. Наука. Инновации: Труды II Международной научно-практической Интернет конференции. Пенза: Изд-во Пензенского филиала РГУИТП, 2010. С. 292–298.

12. Коростелева А.В., Красная Е.Г., Птицин А.Л. Анализ состава сточных вод от промышленных предприятий г. Пензы // Молодёжь. Наука. Инновации: Труды IV международной научно-практической конференции. Пенза: Изд-во Пенз. Филиала РГУИТП, 2011. С. 408–410.

13. Коростелева А.В. Механизм экономической ответственности и количественная оценка качественного состояния водного объекта // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего: Научно методический журнал. – Пенза: Изд-во ПГТА, 2011. С. 161–165.

14. Коростелева А.В., Таранцев К.В. Методы обезвреживания нефтесодержащих отходов // Молодёжь. Наука. Инновации: Труды IV международной научно-практической конференции. Пенза: Изд-во Пенз. филиала РГУИТП, 2011. С. 410–413.

**КОРОСТЕЛЕВА Анна Владимировна**

**ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ВОДЫ  
В НЕФТЕПРОДУКТАХ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ИХ К СЖИГАНИЮ**

**Специальность 03.02.08 – экология (в химии и нефтехимии)**

**А в т о р е ф е р а т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Редактор Л.Ю. Горюнова  
Компьютерная верстка Д.Б. Фатеева, Е.В. Рязановой

Сдано в производство 17.02.12. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Бумага типогр. №1. Печать трафаретная. Шрифт Times New Roman Cyr.  
Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,29. Заказ № 2133. Тираж 100.

---

Пензенская государственная технологическая академия.  
440605, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ ул. Гагарина, 1<sup>а</sup>/11.