

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Газаряна Альберта Владимировича на тему «Численные и физические проблемы разработки однофазных электрогидродинамических систем теплоотвода», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки.

Электрогидродинамика (ЭГД) представляет собой уже устоявшийся междисциплинарный раздел науки, в котором тесно переплелись гидродинамика, электростатика, электрохимия, теплофизика. Как правило, объектом исследований в ЭГД являются среды, обладающие высоким удельным сопротивлением (порядка  $10^7 - 10^{12}$  Ом·см). Одним из наиболее емких определений является следующее: ЭГД-системой называется такая система, в которой определяющими являются электростатические и гидродинамические силы. Многочисленные исследования ЭГД-явлений подытожены в монографиях и обзорах таких авторов как: Г.А. Остроумов, Ю.К. Стишков, А.А. Остапенко, А.И. Жакин, С.М. Коробейников, Дж. Мелчер, В.В. Гогосов, В.А. Полянский, А. Кастелланос, М.К. Болога, и других. В России и за рубежом регулярно проводятся научные конференции, посвященные исследованию проблем электрофизики и электрогидродинамики. Несмотря на то, что ЭГД-технологии пока не так развиты и популярны как электростатические (фильтры, струйные принтеры, электроспиннинг и др.), они имеют неплохие перспективы. Идут разработки таких устройств как: ЭДГ-насосы, теплообменники, эмульгаторы, преобразователи и др. Решение фундаментальных и прикладных проблем электрогидродинамики требует комплексного подхода, сочетающего экспериментальные исследования, построение теоретических моделей ЭГД-процессов и определение ключевых физико-химических параметров системы, компьютерное моделирование, позволяющее определить адекватность моделей и оптимизировать параметры системы для разработки практически значимых устройств.

Перспективность ЭГД-систем теплообмена привлекает исследователей и инженеров, несмотря на то, что проектирование таких систем встречает известные трудности, связанные со сложностью физических механизмов ЭГД-процессов, трудностью их адекватного численного моделирования и построением эффективно работающих устройств. Работа Газаряна А.В.

представляет собой удачное сочетание фундаментальных исследований процессов образования приэлектродного объемного заряда, определяющего интенсивность ЭГД-течений, и практического определения оптимальных конструкций ЭГД-теплообменника и ЭГД-насоса, а также построение достоверных численных моделей их функционирования. В свете этого заявленная автором цель диссертационной работы Газаряна А.В. «...решение численных и физических проблем, связанных с разработкой однофазных электрогидродинамических систем теплоотвода, а также систематизация экспериментальных и численных принципов создания таких систем» является важной, а ее актуальность не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного содержания, заключения, списка используемых обозначений, а также библиографии из 189 наименований.

Во введении автор традиционно обосновывает актуальность темы исследований, формулирует основную и побочные проблемы исследований, а на их основе - цель и задачи, а также положения, выносимые на защиту, описывает научную новизну результатов работы, их теоретическую и практическую значимость, приводит сведения, подтверждающие достоверность и апробацию результатов диссертации.

Первая глава диссертации представляет собой обзор современного состояния экспериментальных и теоретических исследований в области электрогидродинамики и ее приложений к созданию систем теплообмена. Описаны механизмы зарядообразования в жидких диэлектриках, способы интенсификации теплообмена с помощью ЭГД-течений, развитие конструкций ЭГД-теплообменников и ЭГД-насосов.

Во второй главе описаны методики и принципы компьютерного моделирования процессов теплообмена в ЭГД-системах различной конфигурации с использованием метода конечных элементов в COMSOL Multiphysics. Представлены также методики экспериментальных исследований токопрохождения с использованием технологии построения динамических вольт-амперных характеристик (ДВАХ). Описаны достаточно разнообразные конструкции ячеек для электрогидродинамических исследований и свойства исследованных диэлектрических жидкостей. Для изучения поля скоростей электрогидродинамических течений автор использует оптический метод анализа траекторий частиц (PIV-метод).

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию и численному моделированию процессов токопрохождения и развитию ЭГД-течений в различных системах электродов и при различных температурах. Автор предлагает способ количественного определения функции инжекции на основе сопоставления численных и экспериментальных вольт-амперных характеристик. Обнаружено, что функция инжекции чувствительна к изменению конфигурации электродов и их химического состава. Также важным результатом является слабое влияние изменение функции инжекции с температурой на структуру и интенсивность ЭГД-течений.

В четвертой главе автор описывает методику упрощенного моделирования проточных ЭГД-теплообменников. Для повышения эффективности численных расчетов автор предлагает замену 3D стационарной задачи на нестационарную 2D задачу. Автором проведены сравнения вычислений по сложной трехмерной модели и ее упрощенному двумерному варианту, которые показывают хорошее качественное и количественное согласие. Проведено также сопоставление экспериментальных результатов изменения температуры в ЭГД-теплообменнике с данными компьютерного моделирования.

В пятой главе детально исследуется оригинальная конструкция ЭГД-насоса, основанная на ускорении жидкости в отверстии в тонком проводящем барьере с односторонним диэлектрическим покрытием. Построены компьютерные модели движения жидкости в такой системе, распределения давления, кулоновской силы, проводимости, коэффициента диссоциации и других электрофизических характеристик. Предложенная конструкция ЭГД-насоса имеет большой потенциал масштабирования для получения оптимальных характеристик путем соединения основного узла насоса (отверстия в фольге) последовательно и/или параллельно. Это позволяет регулировать важные для такой системы параметры скорость прокачки и развиваемое давление (расход-напор). Это было подтверждено экспериментами с системой из девяти упорядоченных отверстий. Сравнение характеристик ЭГД-насоса с известными аналогами показало значительный потенциал предложенной конструкции, при том, что его изготовление гораздо проще, дешевле и выгоднее в производстве.

В целом диссертация оставляет очень хорошее впечатление. Результаты диссертации представляются новыми и имеющими как теоретическое, так и прикладное значение. В работе подробно описаны результаты измерений и проведено сравнение с данными численного моделирования. Детально описаны конструкции исследованных ЭГД-

теплообменников и ЭГД-насосов. Результаты неоднократно докладывались на авторитетных научных конференциях в России и за рубежом и признаны в научном сообществе. Автором опубликовано по теме диссертации 9 статей, в том числе 5 в научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Диссертация А.В. Газаряна выполнена на весьма высоком научном уровне, однако при её чтении возникает ряд вопросов и замечаний:

- В арсенале автора имелся мощнейший инструмент для исследования распределения скоростей ЭГД-процессов – оптический метод анализа траекторий частиц. Однако автор пользуется этим методом избирательно, фактически только для исследования ЭГД-течений в системе плоскость-лезвие. Использование такого метода для других систем, описанных в работе, в том числе и для оригинальной конструкции ЭГД-насоса помогло бы верифицировать результаты компьютерного моделирования, широко применяемого автором.

- На рисунке 3.15 показаны результаты исследования структур ЭГД-течений в трансформаторном масле ГК-1700 при различных температурах, которые имеют существенные различия по толщине основной струи, положениям центра вихрей и степени растекания вдоль плоскости. Какова физическая причина этих различий? Играет ли роль в этом эффекте уменьшение вязкости жидкости при нагревании?

- На рисунках 5.4 и 5.6 приведен достаточно необычный результат огибания линиями напряженности диэлектрического покрытия электрода, находящегося в жидком диэлектрике. При этом электрическое поле в диэлектрическом покрытии отсутствует. Автор не поясняет как такое возможно, поскольку хорошо известно, что на границе двух диэлектриков нормальная компонента напряженности электрического поля испытывает скачок, определяемый соотношениями диэлектрических проницаемостей (при этом тангенциальная компонента непрерывна).

- Автор не описывает, каким образом были определены оптимальные характеристики ЭГД-насоса (диаметр отверстия, толщина текстолита, размер разделителя платин – спейсера и др.). Подробно описывается способ сверления отверстий в фольгированном текстолите, но почему диаметр отверстия равен именно 0,5 мм, не поясняется. Все расчеты приведены для толщины спейсера около 1 мм. Как автор пришел к этому размеру? Как изменятся параметры ЭГД-насоса, если изменить эту толщину в большую или меньшую сторону?

