

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию ВАСИЛЬКОВА СЕРГЕЯ АНДРЕЕВИЧА на тему: «Структура и свойства электрогидродинамических течений, вызванных эффектом Вина», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 — 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 ЭГД-системы 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, 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 в известной мере 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. Несмотря на то, что в научной литературе сформировалось устойчивое представление о том, что ионная проводимость при наличии инъекционных и диссоциационно-рекомбинационных процессов играет основную роль в ЭГД-явлениях, одним из «белых пятен» в построении моделей является вопрос о природе возникновения пространственного электрического заряда, вызывающего движение жидкости в электрическом поле. В работе Василькова С.А. поднимается новый и важный вопрос о роли второго эффекта Вина в

Вх. № 09/2-20 от 14.01.2020

процессах зарядообразования в ЭГД-системах. В свете этого актуальность диссертационной работы Василькова С.А. не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного содержания, заключения, списка используемых обозначений, а также библиографии из 181 наименования.

Во введении автор традиционно обосновывает актуальность темы исследований, формулирует цели и задачи, положения, выносимые на защиту, описывает научную новизну результатов работы, их теоретическую и практическую значимость, приводит сведения, подтверждающие достоверность результатов диссертации.

Первая глава диссертации представляет собой обзор современного состояния исследований в области электрогидродинамических течений в жидких диэлектриках. Описаны известные из литературы методы экспериментального исследования и компьютерного моделирования электрофизических процессов в жидких диэлектриках. Проанализированы механизмы высоковольтного токопрохождения, образования электрического заряда в жидкостях и ЭГД-течения различных типов. В конце главы проведено обоснование актуальности работы, поставленной цели и задач исследования.

Во второй главе описаны используемые методики экспериментального исследования и математического моделирования. Приведен лежащий в основе математической модели комплекс уравнений, включающий теорему Гаусса в дифференциальной форме, уравнения Пуассона, Нернста-Планка и Навье-Стокса. Описаны принципы построения компьютерных моделей, описываются сами модели и процесс моделирования. Обосновано использование для численного моделирования коммерческого пакета COMSOL Multiphysics, в котором решение заданной системы уравнений для моделируемой системы ищется методом конечных элементов путем построения сетки. В разделе 2.3 приведены конструкции экспериментальных ячеек и методики измерений, в том числе и с использованием современного высокоэффективного метода визуализации движения микрочастиц (PIV-метод). Описаны методики приготовления диэлектрических жидкостей и их физические свойства в зависимости от температуры и концентрации примеси – циклогексанола.

В третьей главе методами компьютерного моделирования рассмотрены процессы зарядообразования и возникновения ЭГД-течений с учетом усиленной диссоциации в электрическом поле. Показано, что у электрода, у

которого усиливается диссоциация, образуется двухслойная биполярная структура объемного заряда, причем область, заряженная противоположно заряду электрода (гетерозаряд), представляет собой диссоциационно-рекомбинационный слой, а область одноименного с электродом заряда образуется вследствие неоднородного усиления интенсивности диссоциации. Моделирование показало, что вольтамперные характеристики незначительно отклоняются от линейной зависимости, а влияние радиуса кривизны острия и учет конвективного переноса заряда дают вклад в изменение токовых характеристик не более нескольких десятков процентов. Автором предлагается изящный способ, который должен помочь разделить влияние процессов инжекции зарядов у поверхности электрода и эффекта Вина на увеличение концентрации носителей и соответственно на возникновение ЭГД-течений. В межэлектродном промежутке располагается достаточно тонкая диэлектрическая пластина с отверстием в центре. Расчеты автора показывают, что внутри такого отверстия возможно получение области с электрическим полем повышенной напряжённости, в которой рост числа носителей заряда будет обусловлен только эффектом Вина. Результаты моделирования показывают существенную нелинейность ВАХ в системах с диэлектрической пластиной с отверстием, что, по мнению автора, подтверждает возникновение эффекта Вина внутри отверстия.

В четвертой главе произведено сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными, которое позволило сделать вывод о том, что при проводимости порядка или больше 10^{-8} См/м в системе лезвие-плоскость для смеси на основе трансформаторного масла преобладающим механизмом зарядообразования является эффект Вина, а инжекцией можно пренебречь. Для проводимостей значений проводимости от 10^{-10} См/м до 10^{-8} См/м играют роль оба механизма, а при проводимостях меньше 10^{-11} См/м эффектом Вина можно пренебречь и учитывать только процессы инжекции зарядов с электрода.

В целом, диссертация оставляет приятное впечатление. Результаты диссертации представляются новыми. В работе подробно описаны технологии расчетов и полученные результаты моделирования электрофизических и электрогидродинамических процессов. Каждая глава предваряется кратким конспектом содержания, что значительно упрощает ознакомление с работой. Результаты неоднократно докладывались на авторитетных научных конференциях в России и за рубежом и признаны в научном сообществе. Автором опубликовано по теме диссертации 6 статей в

весьма авторитетных научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

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

- При расчетах электрофизических процессов в системе электродов с диэлектрической пластиной с отверстием автором используется граничное условие равенства нулю нормальной компоненты электрического поля ($E_N=0$). Это приводит к достаточно необычному результату огибания линиями напряженности диэлектрической пластины (рис. 37), находящейся в жидком диэлектрике, при этом поле внутри пластины оказывается равным нулю?! (см. рис. 47). Однако хорошо известно, что на границе двух диэлектриков нормальная компонента напряженности электрического поля испытывает скачок, определяемый соотношениями диэлектрических проницаемостей (при этом тангенциальная компонента непрерывна). Автор пытается обосновать равенство нулю нормальной компоненты наличием проводимости и экранированием внешнего поля полем объемного заряда у поверхности пластины. Это может быть справедливо для электролитов, но не для слабопроводящих диэлектриков с проводимостью порядка $10^{-8} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, в которых внешнее электрическое поле только частично уменьшается за счет объемного заряда у электродов.

- В ряде современных исследований приэлектродных процессов в жидких диэлектриках показано, что помимо адсорбционных слоев в таких системах образуются так называемые неравновесные слои с характерным размером $\xi_d \sim \frac{\epsilon\epsilon_0 E(\mu_1 + \mu_2)}{\sigma}$, которые для типичных жидких диэлектриков могут иметь размеры порядка десятых долей миллиметра, что сравнимо с радиусом острия электрода или с размером отверстия в диэлектрической пластине. Влияние этого слоя на электрофизические характеристики системы и ЭГД-процессы автор в своих исследованиях не раскрывает.

- К сожалению, некоторые графические материалы в электронной версии диссертационной работы оказались трудночитаемы (например, рис. 64-67). Вследствие низкого разрешения невозможно разобрать ни величин, отложенных по осям, ни их числовых значений. При этом предшествующие рисунки 60-63 выполнены очень качественно.

Несмотря на некоторые замечания и комментарии, считаю, что они не снижают научной ценности результатов и носят в большей степени характер рекомендаций для дальнейшего развития научной работы в данном

направлении. Результаты диссертационной работы являются достоверными и имеют высокую научную значимость.

Диссертация Василькова С.А. на тему: «Структура и свойства электрогидродинамических течений, вызванных эффектом Вина» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Васильков Сергей Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 — Электрофизика, электрофизические установки. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Член диссертационного совета –

профессор кафедры общей и теоретической физики

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

доктор физико-математических наук, доцент

Ерин Константин Валерьевич

10 января 2020 г.

355017 г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1

www.ncfu.ru, тел. (8652) 33-03-54

e-mail: kerin@ncfu.ru

