



Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
**ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ**  
Уральского отделения  
Российской академии наук  
(ИЭФ УрО РАН)

Амундсена ул., д.106, г.Екатеринбург, 620016  
Тел. (343) 267-87-96 Факс (343) 267-87-94  
ОКПО 04839716 ОГРН 1026604936929  
ИНН/КПП 6660007557/667101001

21.02 2020г. № 16346-1256 - 37

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

[Отзыв ведущей организации]

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИЭФ УрО РАН,  
член-корреспондент РАН



Чайковский С.А.

« 21 » февраля 2020 г.

**ОТЗЫВ** ведущей организации

на диссертационную работу Ширяева Александра Александровича

*«Аналитическое исследование закономерностей реализации неустойчивости  
заряженной капли во внешних электростатических полях»*,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы»

**Актуальность.** Диссертационная работа посвящена исследованию устойчивости заряженных капель во внешних электростатических полях. Вопросы неустойчивости заряженных капель имеют большое практическое значение во многих областях науки и технологии, связанных с электродиспергированием жидкостей. Получаемые таким образом заряженные мелкодисперсные аэрозоли находят применение в электростатических осадителях, гомогенизаторах и ионных двигателях, при нанесении лакокрасочных материалов, а также в сельскохозяйственной технике. Контролируемое извлечение заряженных частиц с поверхности жидкостей позволяет создавать наноструктуры из расплавов металлов с требуемыми характеристиками и пленки

каталитических покрытий для топливных элементов. Неоднородные электростатические поля способны снижать порог развития неустойчивостей капель, что может оказаться востребованным для усовершенствования методик генерации мелкодисперсных аэрозолей капель микро- и, в отдельных случаях, нано-метрового размера.

**Структура диссертации.** Объем диссертации составляет 215 страниц, включая список литературы из 132 научных работ, 4 таблицы и 66 рисунков. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения (“Результаты и выводы”), списка цитируемых публикаций и приложения.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, изложены его цели и сформулированы задачи. Дана информация по апробации результатов работы и степени их достоверности. Сформулированы научные положения и результаты, выносимые на защиту. Изложены результаты, определяющие научную новизну исследования.

В первой главе представлен обзор литературы, разделенный на два раздела. В первом разделе дан обзор наблюдений электрогидродинамической неустойчивости жидких капель, начиная с самых ранних и основополагающих работ, заканчивая современными детальными экспериментальными исследованиями. Во втором разделе представлены методы и подходы к аналитическому исследованию критериев реализации неустойчивостей поверхности капель. Проведён анализ условий применимости различных подходов к описанию поведения заряженных капель во внешних электростатических полях.

Во второй главе исследуется неустойчивость заряженных капель в однородном поле, а также неоднородных электростатических полях простейших, модельных конфигураций – полях точечного заряда и точечного диполя. В первом разделе проводится анализ гармоник возмущений границы капли. Изучены особенности распада заряженной капли в электростатическом поле. Продемонстрировано соответствие полученных теоретических результатов известным экспериментальным фактам. Во втором разделе проведено исследование условий развития неустойчивости заряженной капли в поле точечного заряда. Разработана методика приближенного учёта влияния внешнего электростатического поля; сформулированы критерии оценки точности используемых приближений. Установлено, что в неоднородном электростатическом поле на поверхности капли одновременно возбуждается значительно большее число мод, чем в случае однородного поля. Дано выражение для полевого параметра, позволяющее

рассматривать влияние величины внешнего электростатического поля отдельно от влияния степени его неоднородности, и, как следствие, провести сравнение влияния электростатических полей различной конфигурации. Продемонстрировано расщепление критических значений полевого параметра. В третьем разделе проведены аналогичные расчёты для капли в электростатическом поле точечного диполя. Обнаружено возбуждение более широкого спектра связанных мод в сравнении со случаем поля точечного заряда.

В третьей главе изучаются условия реализации неустойчивости заряженных капель в неоднородных электростатических полях более сложной конфигурации. В первом разделе проведено исследование влияния размеров создающего внешнее электростатическое поле игольчатого электрода на условия развития неустойчивости заряженной капли. Во втором разделе изучена неустойчивость заряженной капли в электростатическом поле, создаваемым находящемся под постоянным потенциалом стержневым электродом, что соответствует условиям ряда экспериментов с неоднородным полем. Исследовано влияние геометрических размеров проводящего стержня на пороговые (для реализации неустойчивости капли) значения подаваемого на него потенциала.

В четвёртой главе систематизируются результаты второй и третьей глав. Проводится сравнение влияния внешних полей с различной степенью неоднородности на условия реализации неустойчивости заряженной капли. Выделены общие особенности критического поведения капель, характерные для неоднородных электростатических полей.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по материалам диссертации.

**Автореферат** соответствует диссертации и вполне отражает её содержание. Результаты работы достаточно полно опубликованы в научных журналах, удовлетворяющих требованиям ВАК, и неоднократно докладывались на профильных конференциях и семинарах.

**Новизна исследований и полученных результатов.** Научная новизна работы заключается в исследовании условий реализации распада заряженных капель во внешних неоднородных электростатических полях различной конфигурации строгими методами

аналитической электрогидродинамики. В качестве результатов, представляющих наибольшую важность, можно указать следующие:

1. Сформулированы условия реализации неустойчивости отдельной  $n$ -й моды возмущений поверхности заряженной капли в однородном и неоднородных полях. Предыдущие исследования фокусировались на критериях неустойчивости капли в целом.
2. Проанализировано влияние конфигурации и степени неоднородности внешнего электростатического поля на условия реализации неустойчивости капли. Установлено, что увеличение степени неоднородности поля приводит к снижению критических значений зарядового и полевого параметров.
3. Асимптотическими методами получены аналитические выражения, описывающие модовый состав возмущений границы заряженной капли во внешнем неоднородном электрическом поле. Сделан вывод о расширении спектра возбуждающихся гармоник при увеличении степени неоднородности поля. Необходимо отметить значительный объем вычислений, который потребовалось выполнить диссертанту. Этот результат, имеющий методологический характер, несомненно будет востребован исследователями, изучающими условия и характер реализации неустойчивости капель.
4. Проведен довольно трудоемкий анализ влияния геометрических параметров эквипотенциального стержня, создающего электростатическое поле в окрестности заряженной капли, на условия ее распада. Этот результат может быть полезен при разработке лабораторных установок для электродиспергирования.

Эти положения определяют **научную и практическую значимость** результатов диссертации.

Результаты работы могут быть рекомендованы к ознакомлению в научных подразделениях университетов (ЯрГУ им. П.Г. Демидова, МГУ им. М.В. Ломоносова, Национальный исследовательский университет "МЭИ" и др.), а также в институтах РАН (Институт электрофизики Уральского отделения РАН, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Институт сильноточной электроники СО РАН и др.).

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений** обеспечивается использованием современных асимптотических методов в рамках классической аналитической электрогидродинамики в сочетании с последовательным анализом условий их применимости.

По материалам диссертационной работы имеется ряд замечаний:

1. В работе использовалось предположение о малом смещении центра масс капли за характерные времена развития неустойчивости (это позволяло не учитывать изменение степени неоднородности поля со временем). Желательно получить и проанализировать (без апелляции к экспериментальным данным) соответствующий критерий, выполнение которого требуется для внутренней непротиворечивости развиваемой теории. В частности, интересно было бы увидеть оценки применимости этого предположения для жидкостей с различной вязкостью: с ее ростом, очевидно, будет нарастать время распада капель.
2. Следует обсудить случай, когда втягивание поляризованной капли в область большей неоднородности поля уравнивается взаимодействием её свободного заряда с внешним электрическим полем. Этот частный случай наиболее удобен для анализа, поскольку капля неподвижна и, следовательно, степень неоднородности поля не будет меняться со временем (см. замечание 1).
3. По тексту работы не всегда понятно, когда речь идет о гармониках, а когда о модах осцилляций границы капли (в случае общего положения они являются суперпозицией бесконечного числа гармоник).
4. Не вполне понятен физический механизм, определяющий то, что, согласно проведенному в диссертации анализу, критические для развития неустойчивости величины полевого и зарядового параметров стремятся к фиксированному значению с ростом номера моды возмущения. Почему поверхностное натяжение не подавляет мелкомасштабные неустойчивости? Или же речь тут идет всего лишь о появлении высших гармоник в спектре возмущений (см. замечание 3)?
5. Не проиллюстрированы равновесные формы капель, эволюция возмущений которых анализируются. Это затрудняет восприятие материала диссертации.

Приведённые замечания не снижают общей высокой оценки полученных результатов и могут рассматриваться в качестве рекомендаций к дальнейшему развитию данной тематики.

В целом диссертационная работа Ширяева Александра Александровича «Аналитическое исследование закономерностей реализации неустойчивости заряженной капли во внешних электростатических полях» является законченной научно-исследовательской работой, соответствующей всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением

Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года № 335 (согласно п. 9, “диссертация на соискание ученой степени кандидата наук должна быть научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, либо изложены новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны”), а сам А.А. Ширяев заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы».

Работа была заслушана и обсуждалась на Расширенном семинаре Лаборатории нелинейной динамики ИЭФ УрО РАН (протокол № 12 от 30 октября 2019 года).

Отзыв составил:

главный научный сотрудник ИЭФ УрО РАН,  
д.ф.-м.н., член корреспондент РАН

21 февраля 2020 г.

Н.М. Зубарев

Подпись Н.М. Зубарева заверяю:

Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН,  
кандидат физ.-мат. наук



Е.Е. Кокорина

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук  
(ИЭФ УрО РАН)

620016, Екатеринбург, ул. Амундсена 106

Тел.: 8 (343) 2678796; Факс: 8 (343) 2678794; E-mail: admin@iep.uran.ru