

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента, доктора физико-математических наук Бычкова Владимира Львовича на диссертацию Ширяева Александра Александровича на тему «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».**

### **1. Актуальность темы диссертационного исследования.**

В настоящей работе в рамках классической гидродинамики исследуется неустойчивость капиллярных осцилляций заряженных капель идеальной несжимаемой электропроводной жидкости, находящихся в однородном и неоднородных электростатических полях. Аналитическое исследование влияния неоднородных электростатических полей на устойчивость заряженной капли представляет значительный интерес с точки зрения фундаментальных исследований, так как, несмотря на наличие теоретических описаний электростатической неустойчивости заряженных и незаряженных капель, законченная теория для описания заряженной капли в неоднородном электростатическом поле отсутствует. Результаты работы актуальны в связи с большим числом технических и технологических приложений электростатического распада капли и возможностью усовершенствования установок по электродиспергированию на основании исследований критических условий электростатической неустойчивости поверхности капли.

### **2. Степень обоснованности и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.**

Научные положения и выводы по результатам диссертационной работы сформулированы на основании расчётов краевых задач с использованием аналитических асимптотических методов исследования. Постановка задач выполнена на основании методов и подходов механики сплошной среды. Математическая формулировка задач соответствует классическим представлениям электрогидродинамики. Результаты проведённых расчётов соответствуют результатам, полученным строгими аналитическими методами в основополагающих работах электрогидродинамики, а также согласуются с многочисленными экспериментами по распаду заряженных капель.

### **3. Новизна результатов диссертации.**

Диссертация Ширяева А.А. является самостоятельным научным исследованием, характеризующимся своей новизной и целостностью.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Получены аналитические выражения равновесной формы заряженной проводящей капли в неоднородных осесимметричных электростатических полях различных конфигураций
- Аналитически исследованы закономерности устойчивости капиллярного волнового движения на поверхности заряженной капли в неоднородных электростатических полях.
- Получено, что критические для реализации гидродинамической неустойчивости значения зарядового или полевого параметра монотонно повышаются и стремятся к некоторым постоянным значениям с увеличением номера гармоники.

- Показано, что во внешнем электростатическом поле возбуждаются осцилляции гармоник, связанных взаимодействием с выделенной гармоникой.
- Обнаружено, что при потере устойчивости отдельно взятой гармоникой осцилляций, одновременно с ней теряет устойчивость весь спектр связанных с ней гармоник.

Указанные результаты, являются новыми и научно обоснованными. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в научных разработках Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Института Электрофизики Уральского отделения РАН, Национального исследовательского университета «МЭИ».

#### **4. Структура и общая характеристика диссертационной работы.**

Диссертационная работа достаточно хорошо структурирована, написана понятным научным языком, оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ. Работа содержит введение, четыре главы, раздел «Результаты и выводы», библиографический список из 132 источников и приложение.

**Во введении** указаны объект и предмет исследования, обоснована актуальность темы исследования, её новизна, поставлены цели и задачи работы, отражены степень достоверности, практическая значимость, методология и методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту и апробация результатов.

**Первая глава** посвящена изучению экспериментальных закономерностей электрогидродинамической неустойчивости капли, а также моделей и методов, используемых для теоретического анализа.

В первом параграфе первой главы представлен систематизированный обзор результатов экспериментальных исследований электрогидродинамической неустойчивости капли. Автором рассмотрены исследования, начиная с основополагающих работ начала 20 века, и заканчивая современными экспериментами по электродиспергированию включающих детальные снимки формы и распада капли.

Во втором параграфе первой главы автором проведён анализ теоретических подходов, использовавшихся для описания электростатической неустойчивости заряженных и незаряженных капель. Исследованные подходы систематизированы, а их результаты проанализированы и обобщены.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена исследованию заряженной капли в электростатических полях простейших конфигураций, и состоит из трех разделов:

В параграфе 2.1 рассмотрена задача о неустойчивости капиллярных осцилляций поверхности заряженной капли, находящейся в однородном электростатическом поле. Используются методы и подходы классической электрогидродинамики. Получены результаты, являющиеся исходными для изучения заряженной капли в неоднородных электростатических полях.

В параграфе 2.2 проведено исследование устойчивости заряженной капли, находящейся во внешнем неоднородном электростатическом поле, создаваемым точечным зарядом.

Параграф 2.3 посвящен аналитическому исследованию неустойчивости осцилляций поверхности заряженной капли идеальной жидкости во внешнем электростатическом поле точечного диполя.

**В третьей главе** на основе подходов механики сплошной среды проведено исследование закономерностей реализации неустойчивости заряженной капли в

неоднородных электростатических полях более сложных конфигураций, приближенных к тем, что создаются в лабораторных условиях, а именно:

В параграфе 3.1 средствами математической физики выполнен асимптотический анализ закономерностей неустойчивости капиллярных осцилляций поверхности заряженной капли во внешнем электростатическом поле, создаваемым тонким заряженным стержнем (нитью) конечной длины.

В параграфе 3.2 аналогичный подход был использован для анализа неустойчивости заряженной капли, находящейся в электростатическом поле проводящего стержня, поддерживаемого при постоянном потенциале.

Отдельная четвёртая глава посвящена выделению зависимостей, общих для всех рассмотренных в диссертации неоднородных полей, а также сравнительный анализ критических условий реализации неустойчивости капли в полях различной неоднородности.

## **5. Наиболее существенные научные результаты, полученные лично соискателем**

В диссертационной работе впервые получены следующие научно-значимые результаты:

1. В электрогидродинамических расчетах нулевого порядка малости по отношению амплитуды осцилляций к радиусу заряженной капли идеальной несжимаемой электропроводной жидкости во внешнем однородном электростатическом поле найдена равновесная форма капли, которая может считаться сфероидальной в линейном приближении по величине стационарной деформации.
2. В аналитических асимптотических расчетах первого порядка малости получено дисперсионное уравнение и критические условия реализации неустойчивости заряженной проводящей капли во внешнем однородном электростатическом поле.
3. Асимптотическим методом получено аналитическое выражение равновесной формы поверхности заряженной капли, находящейся во внешних неоднородных электростатических полях различных конфигураций.
4. В электрогидродинамических расчетах первого порядка малости по отношению амплитуды осцилляций к характерному линейному размеру заряженной капли получены аналитические выражения условия, критического для реализации неустойчивости капли во внешнем неоднородных электростатических полях различных конфигураций.
5. В проведённом сравнительном анализе показано, что критические условия реализации неустойчивости заряженной капли снижаются по мере увеличения степени неоднородности внешнего электростатического поля.
6. Для заряженной капли, находящейся во внешнем неоднородном электростатическом поле получены аналитические выражения временных зависимостей осцилляций отдельно взятой гармоники. Показано, что с возбуждением в начальный момент времени осцилляций отдельно взятой гармоники вместе с ней возбуждается набор связанных гармоник.
7. По результатам проведённого теоретического анализа показано, что при потере устойчивости отдельно взятой гармоникой осцилляций, одновременно с ней теряет устойчивость весь спектр связанных с ней гармоник, даже если критические условия реализации электростатической неустойчивости выполняются не для всех связанных взаимодействием гармоник.

8. В рамках гидродинамики получено, что с увеличением номера гармоники критические значения полевого или зарядового параметра возрастают и стремятся к некоторым постоянным значениям.
9. Изучено влияние геометрии поддерживаемого при постоянном потенциале проводящего заряженного стержня, создающего электростатическое поле в окрестности заряженной капли на снижение критических условий реализации электростатической неустойчивости этой капли. На примере электростатического поля стержня проведено сравнение влияния неоднородности и величины поля на неустойчивость заряженной капли.

## **6. Замечания по диссертации**

По представленному тексту диссертации можно сделать следующие замечания и рекомендации:

1. В первой обзорной главе в явном виде не приводится критерий Тейлора, а делается ссылка на него, без указания его смысла. Поэтому возникает вопрос тот-ли это критерий, который используется на стр. 71.
2. Нет комментариев к рис. 1.1.1.2с указанием временных характеристик распадающихся капель.
3. Рис. 1.1. 2.2, 1.1.2.3 и 1.1.3.3 приводятся во внесистемных единицах без перевода их в систему СИ
4. На стр. 23 следовало бы объяснить важность зарядового параметра.
5. Рисунки 2.1.3, 2.1.4 (вторая глава, параграф 2.1), следовало бы отобразить на одном изображении, так как между приведенными рисунками затруднительно провести визуальное сравнение, несмотря на то, что они приведены в одинаковых единицах и масштабах.
6. В работе желательно было бы отдельно рассмотреть случай капли, висящей неподвижно в электростатическом поле, когда электрические силы отталкивания капли от одноименно заряженного стержня компенсируются втягиванием поляризованной капли в область большей неоднородности создаваемого этим стержнем поля.
7. В работе следует дать теоретическую оценку характерного времени распада капли на основании которой можно сделать выводы о величине смещения капли за характерное время реализации её неустойчивости.
8. Целесообразным было бы объединение параграфов 2.2 и 2.3. так как математическая процедура близка, и можно сократить объём диссертации, ограничившись приведением выводов и результатов по обоим параграфам.

**При этом следует заметить**, что высказанные замечания никак не снижают ценности и весомости диссертационной работы, выполненной Ширяевым А. А., и могут рассматриваться как пожелания для дальнейших исследований. В целом диссертационная работа производит положительное впечатление.

## **7. Соответствие автореферата диссертации**

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

## **8. Апробация работы и публикации.**

Диссертация прошла апробацию на всероссийских и международных конференциях и научных семинарах. Полученные в диссертационной работе результаты имеют существенное

значение для электрогидродинамики, гидродинамики, механики сплошной среды.

Опубликованные работы соответствуют тематике диссертации.

Выносимые на защиту научные положения достаточно полно отражены в 11 работах, из них 6 статей - в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК.

## 9. Заключение.

Считаю, что представленная диссертация «Аналитическое исследование реализации закономерностей неустойчивости заряженной капли во внешних электростатических полях» соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Ширяев А.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 Механика жидкости, газа и плазмы.

### Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, с.н.с., ведущий научный сотрудник  
кафедры физической электроники  
Физического факультета Московского государственного  
университета им. М.В.Ломоносова,  
Эл. адрес: [bychvl@gmail.com](mailto:bychvl@gmail.com) Тел. 8 (495) 939-17-87; 7 (916) 025-70-91

Владимир Львович Бычков

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, дом 1, строение 2,  
Физический факультет

тел.: +7 495 939-16-82

e-mail: [info@physics.msu.ru](mailto:info@physics.msu.ru)

### Декан физического факультета

доктор физико-математических наук,

профессор



Николай Николаевич Сысоев