


«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ФБГОУ ВПО «НИУ МЭИ»

по научной работе  
В.К. Драгунов



« 3 »



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
на диссертацию Н.Ю. Колбневой «Капиллярные осцилляции заряженной  
поверхности капли и генерация электромагнитных волн», представленную на  
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

### Актуальность темы диссертационной работы.

Диссертационная работа Колбневой Н.Ю. посвящена  
электрогидродинамическому исследованию невязкого затухания  
капиллярных осцилляций капли идеальной жидкости на основе идей и  
подходов механики сплошной среды в рамках закона сохранения энергии и  
общей теории излучения.

Изучение капиллярных осцилляций заряженных капель во внешних  
электростатических полях и физических закономерностей реализации их  
электрогидродинамической неустойчивости представляет интерес в связи с  
большим количеством академических, технических и технологических  
приложений капиллярного распада капель.

В частности, капиллярные осцилляции заряженной капли во внешнем  
однородном электростатическом поле делают её источником  
радиоизлучения. Изучение возникающего при ускоренном движении  
заряженной поверхности капли (при капиллярных осцилляциях)  
электромагнитного излучения актуально в связи с проблемами

радиолокационного зондирования облаков и туманов, проблемой радиопомех от огней Св. Эльма (появляющихся на обшивке и остеклении самолётов при их полётах в облаках).

### **Новизна исследования и полученных результатов.**

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выполнено аналитическое асимптотическое исследование в рамках физико-химической гидродинамики закономерностей реализации капиллярного волнового движения на поверхности заряженной капли, осциллирующей в однородном электростатическом поле;

2. Найдена на основе идей и подходов механики сплошной среды асимптотическим методом возникающая при капиллярных осцилляциях заряженной капли квадрупольная компонента электромагнитного излучения;

3. Получена асимптотическим методом возникающая при капиллярных осцилляциях в однородном электростатическом поле незаряженной капли дипольная и квадрупольная компоненты электромагнитного излучения;

4. Найдена асимптотическим методом в рамках физико-химической гидродинамики возникающая при капиллярных осцилляциях во внешнем электростатическом поле заряженной капли дипольная компонента электромагнитного излучения;

5. Доказано на основе идей и подходов механики сплошной среды, что теоретические расчеты интенсивности излучения, возникающего при осцилляциях заряженной поверхности капель, на основе закона сохранения энергии совпадают с расчетами, проведенными на основе общей теории излучения.

Перечисленные результаты являются новыми, получены лично автором в ходе выполнения работы по теме диссертации. Они, безусловно, открывают перспективы для дальнейших исследований. Их можно использовать в научно-исследовательской деятельности таких учреждений, как Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Национальный

исследовательский университет «МЭИ», Высокогорный геофизический институт.

**Степень обоснованности и достоверности каждого научного положения, выводов и заключений соискателя, сформулированных в диссертации.**

Основные научные положения, выводы и заключения диссертационной работы в достаточной мере обоснованы и логически вытекают из поставленных соискателем целей и задач исследования. Они установлены на основе выполненных теоретических электрогидродинамических исследований, не противоречащих общим представлениям механики сплошной среды.

Первое вывод сводится к аналитическому исследованию в первом порядке малости по безразмерной амплитуде осцилляций закономерностей реализации капиллярного волнового движения на поверхности незаряженной капли, осциллирующей в однородном электростатическом поле, и возможности появления электромагнитных волн при расчете методом Калечица-Полуэктова на основе закона сохранения энергии.

Обоснованность и достоверность данных результатов вытекает из корректной математической постановки и аккуратного аналитического асимптотического решения краевой задачи об осесимметричных капиллярных осцилляциях незаряженной капли идеальной жидкости во внешнем электростатическом поле, находящейся в идеальной несжимаемой диэлектрической среде.

Полученные выводы опираются на теоретически обоснованный и апробированный метод анализа невязкого затухания капиллярных осцилляций незаряженной капли идеальной несжимаемой электропроводной жидкости во внешнем электростатическом поле на основе закона сохранения энергии, впервые предложенного В.И. Калечицем, И.Е. Нахутиным, П.П. Полуэктовым.

Второй вывод посвящен анализу в рамках общей теории возникающего при капиллярных осцилляциях незаряженной капли во внешнем электростатическом поле дипольному электромагнитному излучению обнаруживаемому в электрогидродинамических расчетах первого порядка малости по безразмерной амплитуде осцилляций.

Результаты обосновываются применением строгих апробированных моделей и методов математической физики для решения электрогидродинамической задачи о капиллярных осцилляциях незаряженной капли идеальной жидкости во внешнем электростатическом поле и возможности генерации электромагнитных волн дипольного типа на основе общей теории.

Полученные соискателем результаты допускают ясное физическое истолкование. Достоверность полученных аналитических результатов не вызывает сомнений, поскольку она подтверждается сопоставимостью с известными теоретическими решениями и экспериментальными данными, полученными другими исследователями, а также сопоставимостью двух эффективных подходов (на основе закона сохранения энергии и общей теории излучения) для анализа невязкого затухания капиллярных осцилляций незаряженной капли идеальной несжимаемой электропроводной жидкости во внешнем электростатическом поле.

В третьем выводе уделено внимание анализу принадлежности возникающего при капиллярных осцилляциях заряженной капли электромагнитного излучения к квадрупольному типу, обнаруживаемому в электрогидродинамических расчетах первого порядка малости по отношению амплитуды осцилляций к радиусу капли.

Данные результаты аргументированы корректными асимптотическими аналитическими расчетами в строгой математической постановке электрогидродинамической задачи о капиллярных осцилляциях заряженной капли идеальной несжимаемой электропроводной жидкости и использованием теоретически обоснованного метода на основе общей теории

излучения для исследования невязкого затухания капиллярных осцилляций заряженной капли. Достоверность полученных результатов базируется сопоставимостью с известными теоретическими решениями и экспериментальными данными.

Достоверность этого положения подтверждается согласованием электрогидродинамических расчетов, выполненных в рамках двух апробированных методов: на основе закона сохранения энергии и общей теории излучения.

В четвертом выводе показано, что дипольное электромагнитное излучение от осциллирующей заряженной капли обнаруживается в расчетах второго порядка малости по безразмерной амплитуде осцилляций, когда в спектре начального возбуждения присутствуют две моды с последовательными номерами, приводящие к возбуждению первой моды осцилляций.

Достоверность и обоснованность данного результата определяет анализ большого числа научных публикаций, посвященных исследованию капиллярных осцилляций конечной амплитуды капли идеальной несжимаемой электропроводной жидкости. Полученный вывод вытекает из использования строгих математических моделей с применением классического аппарата механики сплошной среды, электрогидродинамики, гидродинамики, аналитических асимптотических методов классической математической физики.

Пятый вывод посвящен аналитическому исследованию в первом порядке малости по безразмерной амплитуде осцилляций закономерностей реализации капиллярного волнового движения на поверхности заряженной капли, неподвижной в суперпозиции гравитационного и электростатического полей, и возможности возникновения электромагнитных волн на основе закона сохранения энергии по Калечицу-Полуэктову.

Высокая степень обоснованности и достоверности данных результатов подтверждается корректной постановкой и решением

электродинамической задачи о расчете осесимметричных капиллярных осцилляций заряженной капли идеальной несжимаемой электропроводной жидкости в идеальной несжимаемой диэлектрической среде, неподвижно висящей в суперпозиции гравитационного и однородного электростатического полей, на основе энергетического подхода.

Достоверность полученных выводов не вызывает сомнений, так как электродинамические расчеты невязкого затухания капиллярных осцилляций капли идеальной жидкости проведены в рамках апробированного метода на основе закона сохранения энергии, предложенного В.И. Калечицем, И.Е. Нахутиным, П.П. Полуэктовым.

В шестом выводе показано, что асимптотическим методом найдена возникающая при капиллярных осцилляциях заряженной сферической капли дипольная компонента электромагнитного излучения в рамках общей теории, обнаруживаемая в расчетах с сохранением членов второго порядка малости по отношению амплитуды осцилляций к характерному линейному размеру капли.

Достоверность этих результатов подтверждается физической обоснованностью постановки задачи о капиллярных осцилляциях заряженной капли, неподвижной в суперпозиции гравитационного и однородного электростатического полей, и строгим аналитическим характером её рассмотрения с применением математических средств механики сплошной среды, гидродинамики, электродинамики. Обоснованность ряда аналитических результатов достигается сопоставимостью с известными теоретическими решениями. Достоверность научного положения базируется на использовании эффективного метода анализа невязкого затухания капиллярных осцилляций капли на основе общей теории излучения.

В седьмом выводе показано, что дипольное излучение незаряженной капли, осциллирующей в электростатическом поле, обнаруживается в электродинамических расчетах первого порядка малости по

безразмерной амплитуде осцилляций, а от осциллирующей заряженной капли – в электрогидродинамических расчетах второго порядка, причем, дипольная компонента полного излучения на 15 порядков величины интенсивнее по сравнению с квадрупольной.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений, так как обусловлена корректной математической постановкой и аккуратным аналитическим асимптотическим решением краевых задач об осцилляциях заряженной капли идеальной жидкости во внешнем электростатическом поле, использованием теоретически обоснованных и апробированных методов анализа невязкого затухания капиллярных осцилляций заряженной капли идеальной несжимаемой электропроводной жидкости во внешнем электростатическом поле.

Достаточная степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и заключений, разработанных автором, доказывается апробацией результатов исследования. Защищаемые научные положения в полной мере отражены в работах соискателя, опубликованных в профильных высокорейтинговых журналах.

### **Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертанта.**

Научная значимость диссертационной работы состоит в том, что проведен анализ капиллярных осцилляций заряженной поверхности капли идеальной жидкости и исследована возможность невязкого затухания капиллярных осцилляций заряженной капли во внешнем электростатическом поле на основе закона сохранения энергии и общей теории излучения.

Полученные соискателем результаты и выводы могут играть важную роль в анализе физических процессов, идущих в жидкокапельных системах искусственного и естественного происхождения: облаках, туманах, дожде.

Они могут быть использованы в разнообразных академических, технических и технологических приложениях, с успехом могут найти

практическое применение в гидрометеорологии, геофизике (в частности, в теории грозowego электричества), радиолокации, авиации, а также при решении задач радиофизики.

Полученные оценки интенсивности возникающего при капиллярных осцилляциях заряженной поверхности капель воды электромагнитного излучения и диапазона частот, в котором оно наблюдается, позволили дать ряд практических рекомендаций, направленных на надежную регистрацию электромагнитного излучения от осциллирующих внутриоблачных капель, составляющих грозвое облако.

### **Соответствие автореферата диссертации.**

Основные разделы работы, результаты и выводы представлены в автореферате. Автореферат соответствует требованиям ВАК и полностью отражает основное содержание диссертации.

### **Общая характеристика работы.**

По своей структуре текст диссертации состоит из введения, трех глав, раздела «Рекомендации экспериментаторам», раздела «Результаты и выводы», списка литературы и приложения. Диссертация изложена на 201 странице, содержит 32 рисунка. Список литературы имеет ссылки на 161 источник.

Во введении обозначен объект и предмет исследования, изложена актуальность исследуемой проблемы, поставлены цели и задачи, отмечены научная новизна, практическая ценность, методология и методы исследования работы, а также выделены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации представляет собой литературный обзор, в котором рассмотрены основные достижения по исследуемой проблеме. Приведены основные результаты экспериментальных и теоретических исследований капиллярных осцилляций и электрогидродинамической



устойчивости капли вязкой несжимаемой электропроводной жидкости. Изложены основы используемых в работе методов исследования затухания капиллярных осцилляций капли идеальной жидкости: метод на основе закона сохранения энергии, впервые предложенный В.И. Калечицем, И.Е. Нахутиным, П.П. Полуэктовым, и метод на основе общей теории излучения электромагнитных волн.

Вторая глава диссертации посвящена физико-химическому анализу возможности затухания капиллярных осцилляций капли вязкой несжимаемой электропроводной жидкости на основе энергетического подхода.

В разделе 2.1 рассмотрена задача об электрогидродинамическом расчете капиллярных осцилляций поверхности заряженной капли и генерации при этом электромагнитных волн.

В расчетах первого порядка по отношению амплитуды осцилляций заряженной капли к её характерному линейному размеру в волновой зоне найдена напряженность электрического поля и выведено дисперсионное уравнение, имеющее комплексное решение. Мнимая часть частоты характеризует декремент затухания капиллярных осцилляций, невозможного в идеальной жидкости, из чего сделан вывод о наличии излучения, возникающего при ускоренном движении заряженной поверхности капли. Оценена интенсивность излучения по порядку величины.

В разделе 2.2 исследована возможность появления затухания капиллярных осцилляций незаряженной капли идеальной жидкости во внешнем электростатическом поле за счёт необратимых потерь энергии на излучение электромагнитных волн на основе идей и подходов механики сплошной среды.

В электрогидродинамических расчетах первого порядка малости по безразмерной амплитуде осцилляций найдена равновесная форма незаряженной капли в однородном электростатическом поле, оказавшаяся

сфероидальной в линейном приближении по величине стационарной деформации.

В асимптотических расчетах первого порядка по безразмерной амплитуде осцилляций незаряженной сфероидальной капли в волновой зоне найдено дисперсионное уравнение, решение которого имеет комплексный вид. Мнимая часть частоты означает затухание осцилляций, связанное с потерей энергии на излучение электромагнитных волн. В рамках закона сохранения энергии оценена интенсивность излучения.

Раздел 2.3 посвящен электрогидродинамическому аналитическому решению задачи о возможности появления затухания капиллярных осцилляций поверхности заряженной капли, неподвижной в суперпозиции поля сил тяжести и однородного электростатического поля, не связанном с вязкой диссипацией энергии на основе подходов механики сплошной среды и закона сохранения энергии.

В электрогидродинамических расчетах нулевого порядка малости по безразмерной амплитуде осцилляций показано, что искажение сфероидальной формы заряженной капли, неподвижной в суперпозиции гравитационного и электростатического полей, за счёт собственного заряда проявляется уже в более высоком порядке малости квадрата эксцентриситета, чем первый.

В аналитических асимптотических расчетах первого порядка малости по безразмерной амплитуде осцилляций получено дисперсионное уравнение, найден декремент затухания капиллярных осцилляций капли, проведена оценка интенсивности излучения на основе энергетического подхода.

В третьей главе диссертации уделено внимание исследованию невязкого затухания капиллярных осцилляций капли идеальной жидкости с использованием иного подхода, основанного на общей теории излучения.

Раздел 3.1 посвящен исследованию капиллярных осцилляций заряженной капли идеальной несжимаемой электропроводной жидкости и генерации ими электромагнитного излучения квадрупольного типа.

В электрогидродинамических расчетах первого порядка малости по отношению амплитуды осцилляций заряженной капли к её характерному линейному размеру найдены образующая возмущенной капиллярным волновым движением свободной поверхности капли, поверхностная плотность собственного электрического заряда и зависящий от времени её квадрупольный момент, генерирующий квадрупольное излучение. Показано, что интенсивность квадрупольного излучения осциллирующей заряженной капли совпала с оценкой, выполненной на основе закона сохранения энергии.

В разделе 3.2 решена задача о капиллярных осцилляциях незаряженной капли идеальной несжимаемой электропроводной жидкости во внешнем однородном электростатическом поле и генерации ими дипольного излучения.

Для незаряженной капли, осциллирующей в электростатическом поле, в электрогидродинамических расчетах первого порядка малости по безразмерной амплитуде осцилляций найдены капиллярное волновое возмущение равновесного сфероида, поверхностная плотность индуцированного внешним электростатическим полем заряда, а также дипольный момент, осциллирующий во времени и генерирующий излучение дипольного типа. Обнаружено, что оценка интенсивности дипольного излучения незаряженной капли, осциллирующей во внешнем электростатическом поле, совпадает по порядку величины с оценкой на основе энергетического подхода.

В разделе 3.3 на основе идей и подходов механики сплошной среды проведено исследование капиллярных осцилляций незаряженной капли идеальной несжимаемой электропроводной жидкости в однородном электростатическом поле и генерации ими квадрупольного излучения.

В электрогидродинамической асимптотической процедуре рассчитан квадрупольный момент незаряженной сфероидальной капли, возмущенной капиллярным волновым движением, и по известным формулам общей теории

оценена интенсивность его излучения, которая оказалась на 15 порядков величины слабее по сравнению с интенсивностью дипольного излучения.

В разделе 3.4 решена задача о капиллярных осцилляциях заряженной капли идеальной несжимаемой электропроводной жидкости, неподвижной в суперпозиции гравитационного и внешнего однородного электростатического полей, и генерации излучения дипольного типа.

В электрогидродинамических расчетах первого порядка малости по отношению амплитуды осцилляций к радиусу заряженной капли в суперпозиции гравитационного и электростатического поле рассчитаны капиллярное волновое возмущение сфероидальной формы капли, поверхностная плотность заряда и зависящий от времени дипольный момент, генерирующий излучение дипольного типа. При этом величина диполя, возникающего при осцилляциях положения собственного заряда капли, найдена в расчетах второго порядка малости по безразмерной амплитуде осцилляций.

В электрогидродинамических асимптотических расчетах второго порядка малости по безразмерной амплитуде осцилляций показано, что если в спектре начального возбуждения присутствуют две моды с последовательными номерами, то возбуждается первая мода осцилляций, превращая осциллирующую заряженную каплю в излучатель дипольного типа.

В разделе «Результаты и выводы» представлены наиболее важные научные результаты, полученные при выполнении всей диссертационной работы.

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

Диссертация Колбневой Н.Ю. прошла достаточную апробацию на всероссийских и международных научных конференциях. Результаты диссертации опубликованы в 10 работах, 5 из которых – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

### Замечания по диссертации.

В диссертационной работе выявлены следующие недостатки:

1. Отсутствуют электрогидродинамические расчёты в рамках общей теории излучения квадрупольного момента заряженной капли во внешнем электростатическом поле. Было бы неплохо провести их.

2. Расчёты второго порядка малости по безразмерной амплитуде осцилляций могут привести к интенсивностям излучения, сравнимым по порядку величины с расчётами первого порядка малости, т.к. амплитуда первой моды капиллярных осцилляций (определяемая в расчётах второго порядка малости) может быть значительной.

3. Во второй главе, в разделе 2.2 рисунки 2.2.3 и 2.2.4 можно было не приводить в виду крайне малой величины интенсивности излучения (порядка  $10^{-306}$  эрг/с), а ограничиться лишь оценками по порядку величины в тексте диссертации.

4. В названии раздела 3.4 (стр. 3, стр. 145) допущена опечатка: вместо «... генерация ими квадрупольного излучения» должно быть «... генерация ими дипольного излучения».

В самом разделе 3.4 выражение для интенсивности дипольного излучения от индуцированного внешним электростатическим полем заряда капли, получающееся в электрогидродинамических расчетах первого порядка малости по амплитуде осцилляций, детально разбирается, а выражение для излучения собственного заряда капли даётся фактически без вывода, хотя это единственная часть диссертации, основанная на расчётах второго порядка малости.

Следует заметить, что упомянутые замечания не снижают теоретической и практической ценности диссертационной работы и являются мотивацией к дальнейшим исследованиям. Результаты диссертации, безусловно, найдут применение в дальнейших исследованиях.

### Заключение.

Диссертация Колбневой Н.Ю. на тему «Капиллярные осцилляции заряженной поверхности капли и генерация электромагнитных волн» является законченной научно-исследовательской работой. По своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований и практической значимости полученных результатов представленная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор достоин присуждения искомой степени по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв утверждён на заседании кафедры «низких температур» № 01-18/19 от 31.08. 2018 года.

И.о. заведующего кафедрой низких температур НИУ «МЭИ»,

к.т.н., доц.

Д.т.н., профессор

кафедры низких температур НИУ «МЭИ»



Ю.Ю. Пузина



А.С. Дмитриев