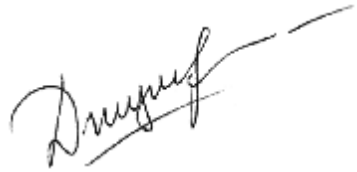


На правах рукописи



Джуманджи Варвара Анатольевна

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УПОРЯДОЧЕННОГО
ВОДНОГО АЭРОЗОЛЯ – КАПЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология,
агрометеорология

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень - 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт криосферы Земли» СО РАН

Научный руководитель:	доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник ФГБУ «Институт криосферы Земли» СО РАН Горелик Яков Борисович
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией «Физики аэрозолей» Санкт-Петербургского государственного университета Ивлев Лев Семенович, кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией «Физики облаков» федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория» им. А.И. Воейкова» Довгалюк Юлия Александровна
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Защита диссертации состоится «18» декабря 2013 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 327.005.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций в федеральном государственном бюджетном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» по адресу: 194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова».

Автореферат разослан « 12 ноября » 2013 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций,
доктор географических наук

А.В. Мещерская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Водные аэрозоли представляют собой взвесь микроскопических капель воды размером от долей до десятков и сотен микрон в атмосферном воздухе. Они широко распространены в виде туманов и облаков в слое, распространяющемся от поверхности земли на десятки километров. Водные аэрозоли играют чрезвычайно важную роль в формировании погоды и климата Земли [Ивлев, Довгалюк, 1999; Горшков, 1994]. С одной стороны, аэрозоли управляют величиной альbedo системы «земная поверхность – атмосфера» и поддерживают его значение в пределах 0,3-0,4. В результате, часть коротковолновой солнечной радиации отражается от земной поверхности и атмосферы в космос, и температура поверхности снижается. С другой стороны, водные аэрозоли захватывают значительную часть длинноволнового излучения земной поверхности и направляют его назад к поверхности, приводя к росту температуры (парниковый эффект). С третьей стороны, фазовые переходы воды в атмосфере и на поверхности земли также влияют на энергетический баланс между поверхностью земли, атмосферой и космосом.

До недавних пор считалось, что капли воды в водных аэрозолях взаимодействуют друг с другом путем столкновений, а дальнoдействующее взаимодействие между каплями на расстояниях, превышающих сумму радиусов капель, отсутствует. Однако, около десяти лет назад в научной литературе появились сообщения о том, что капли воды в водном аэрозоле в лабораторных условиях могут образовывать пространственно упорядоченную структуру – капельный кластер (с межкапельным расстоянием около 3-6 радиусов капель) [Федорец, 2004, 2005, 2010], подобно способности частиц пыли образовывать пылевой кристалл в комплексной плазме [Фортов, 2004; Цытович, 1997, 2003] или способности пространственного упорядочения коллоидных частиц в растворах [Koh, 2007]. В литературе было также показано, что капельные кластеры обладают поверхностным натяжением и вязкостью, которая при низкой турбулентности среды может на порядок превышать вязкость чистого воздуха [Shavlov, 2012; Шавлов, 2012]. В связи с этим возникает закономерный вопрос: могут ли возникать пространственно упорядоченные структуры в естественных природных условиях – атмосферных облаках и туманах? Способны ли эти структуры влиять на механические свойства атмосферы, на скорость переноса в атмосфере тепла и массы, на стабильность пограничных слоев между атмосферой и другими оболочками Земли (гидросферой, литосферой, криосферой, биосферой и т.д.) и на скорость теплообмена между ними? В какой степени процессы капельного упорядочения в

водных аэрозолях способны влиять на погоду и климат? Для того, чтобы ответить на подобные вопросы необходимы детальные знания физических свойств капельных кластеров, механизмов их образования и длительного существования, распространенности кластеров и других более сложных упорядоченных капельных структур в реальной атмосфере, механизмов влияния данных структур на теплофизические атмосферные характеристики. В настоящее время капельные кластеры исследованы слишком мало, и ответов на сформулированные вопросы пока нет. Но необходимость их исследования очевидна, т.к. полученные знания о возможностях структурного упорядочения атмосферных аэрозолей могут привести к существенному улучшению качества существующих численных моделей циркуляции атмосферы Земли, а также для улучшения качества прогнозирования погоды и климата.

Цель работы. Целью настоящей диссертационной работы в свете перечисленных вопросов явилось

Экспериментальное исследование геометрических и электрических свойств упорядоченного водного аэрозоля - капельного кластера в широкой области температур.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1) Создать экспериментальную установку для получения капельных кластеров в широком интервале температур. Разработать методику визуальных наблюдений, фото- и видео-регистрации кластеров с использованием оптической микроскопии и видеоаппаратуры. Разработать методику измерения геометрических размеров кластеров.

2) Измерить геометрические размеры кластеров (диаметр капель, межкапельное расстояние, высоту левитации кластера) при различных температурах.

3) Разработать методику приложения электрического поля к области пространства, занятой капельным кластером. Измерить вариацию геометрических параметров кластера в электрических полях положительной и отрицательной полярности при различных температурах.

4) Выполнить анализ полученных экспериментальных данных. На основе опытных данных вычислить электрический заряд капель воды в кластере. Проанализировать механизмы левитации кластера и межкапельного взаимодействия

5) Проанализировать распространенность пространственно упорядоченных капельных структур в атмосфере и обсудить механизмы влияния капельных структур на перенос тепла и массы.

Научная новизна.

- Впервые изучены геометрические характеристики капельного кластера такие, как средние диаметр капель, высота левитации, межкапельное расстояние и закономерности отношения между данными характеристиками.
- Впервые измерен электрический заряд капель, образующих капельный кластер и установлено правило расположения капель кластера на расстоянии двух радиусов Дебая друг от друга.
- Впервые численно обоснована возможность существования упорядоченных капельных структур в атмосферных облаках и туманах и механизм их влияния на перенос тепла и массы.

Практическая значимость работы. Анализ полученных данных позволил выдвинуть и численно обосновать механизм межчастичного взаимодействия в капельном кластере, ответственный за пространственное упорядочение капель. Численно обоснована возможность существования упорядоченных капельных структур в атмосфере и механизм их влияния на ее теплофизические свойства. Полученные результаты могут послужить основой для совершенствования и уточнения современных численных моделей циркуляции атмосферы в макро-, мезо-, и микромасштабе, а также для улучшения качества прогнозирования погоды и климата.

Защищаемые положения. На защиту выносятся:

1. Экспериментальная установка и комплекс методик измерения характеристик капельного кластера, в том числе методик получения кластера, регистрации температуры поверхности воды, создания подсветки капель, приложения электрического поля к капельному кластеру, измерения межфазного электрического тока и потенциала при испарении воды, регистрации изображений и измерения диаметра капель, межкапельного расстояния и высоты левитации капель над поверхностью воды.
2. Результаты измерения геометрических характеристик капельного кластера в широкой области температур. Математическое доказательство гексагонального упорядочения капель в кластере. Численное обоснование гравитационно-стоксовского механизма левитации капель над поверхностью подогретой воды.
3. Результаты исследования электрических свойств капельного кластера. Измерение электрического заряда капель. Определение правила расположения капель в кластере на расстоянии двух радиусов Дебая друг от друга.

4. Численное обоснование возможности существования пространственно упорядоченных структур из капель воды в атмосферных облаках и туманах, их влияния на поверхностное натяжение облаков и механизм влияния капельных структур на тепломассоперенос в атмосфере посредством увеличения вязкости воздуха и подавления конвекции.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах Института криосферы Земли СО РАН, на научно-практических конференциях ТГНГУ (Тюмень, 2009, 2010, 2011), на всероссийской научной конференции «Фундаментстройаркос» (Тюмень, 2010), на X международной конференции по мерзлотоведению (Салехард, 2012)

Публикации. По результатам исследований опубликованы четыре работы в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ и одна работа в материалах международной конференции.

1. Shavlov A.V., Dzhumandzhi V.A. Spatially ordered structures in storm clouds and fogs // *Physics Letters A*, 2010, v.374, p.2561–2565.
2. Шавлов А.В., Джуманджи В.А., Романюк С.Н. Пространственно упорядоченные структуры из капель воды в атмосферных облаках // *Криосфера Земли*, 2011, Т.XV, №4, с.52-54.
3. Shavlov A.V., Dzhumandzhi V.A., Romanjuk S.N. Electrical properties of water drops inside the dropwise cluster // *Physics Letters A*, 2011, v.376, p.39–45
4. Шавлов А.В., Джуманджи В.А. Геометрические параметры кластера из капель воды // *ЖЭТФ*, 2012, том14, вып.2, стр.288-291.
5. Shavlov A.V., Dzhumandzhi V.A., Romanjuk S.N. Water in form of spatially ordered droplets near the vapor-water boundary. Proceeding of the tenth international conference on permafrost. Salekhard, Yamal-Nenets autonomous district, Russia, June 25-29, 2012, p. 385-387.

Личный вклад соискателя. Защищаемая работа – итог четырехлетней деятельности автора в качестве непосредственного исполнителя научно-исследовательских и опытно-методических работ по структурным и электрическим свойствам водного аэрозоля. Все материалы получены лично автором, им также проанализированы и обобщены данные, полученные другими исследователями.

Степень достоверности результатов, полученных при изучении водного аэрозоля, подтверждена использованием традиционных экспериментальных методик, большим количеством и высокой

повторяемостью полученных результатов измерений, использованием методов математической физики для обработки данных, численным согласованием полученных результатов с результатами измерений параметров родственных аэрозолю объектов - пылевых структур в физике пылевой плазмы.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю г.н.с. ИКЗ СО РАН, д.г.-м.н. Я.Б.Горелику за постановку научной проблемы и руководство работой на всех этапах исследования, г.н.с. ИКЗ СО РАН, д.ф.-м.н. А.В.Шавлову за практическую помощь в выполнении исследований, обсуждении полученных результатов. Автор благодарен научному сотруднику ИКЗ СО РАН С.Н.Романюку за многочисленные плодотворные обсуждения экспериментальных результатов и помощь в выполнении расчетов.

Особую благодарность автор выражает директору ИКЗ СО РАН академику РАН В.П.Мельникову за внимание и интерес к теме исследований и поддержку, проявленную на всех этапах выполнения диссертационной работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения пяти глав, выводов и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 114 страниц, в том числе 38 рисунков, список литературы, составляющий 76 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований.

В первой главе представлен обзор литературных данных, в котором отражены современные научные представления о механизмах образования и роста водных аэрозолей в атмосфере. Описаны современные представления о механизмах формирования облаков, отмечена их исключительно важная роль в формировании климата Земли посредством влияния на альбедо на границе поверхность Земли – космос, на парниковый эффект, на баланс теплоты в атмосфере при фазовых переходах воды. При этом было отмечено, что малоизученным осталось важное явление образования пространственно упорядоченных структур из капель воды в аэрозолях. Подобные структуры, обладающая вязкостью, более высокой, чем вязкость воздуха, могут играть важную роль в формировании облаков и влиянии на климат. Поэтому, исследования, цель которых была сформулирована во Введении, представляются важными.

Во второй главе приведено описание экспериментальной установки, Рисунок 1, и экспериментальных методик, разработанных для изучения физических свойств капельного кластера. Капельный кластер над поверхностью воды получали по методике, использующей локальный нагрев поверхности воды. Температуру нагревателя варьировали в интервале 60-100 С. Регистрацию температуры осуществляли с помощью полупроводникового диода, включенного в прямом направлении в цепь постоянного тока. Вольт-температурная характеристика диода была близка к линейной. Диод находился в тесном тепловом контакте с нагревателем. Погрешность измерения температуры нагревателя составляла ± 1 С. Погрешность определения температуры поверхности воды была выше из-за переменной толщины слоя. Эту погрешность оценивали в $+1/-10$ С. Атмосферные условия были близки к стандартным: температура окружающего воздуха составляла 20-25 С. Атмосферное давление 740-770 мм.рт.ст. Влажность воздуха равнялась 60-80 %.

Кластер наблюдали с помощью бинокулярного микроскопа с семикратным увеличением МБС-2. Наблюдения выполняли под углами зрения 90° и 30° к поверхности воды. Регистрацию видеоизображений осуществляли с помощью цифровой камеры MUSEscope 310 M. Абсолютная погрешность определения размеров по видеоизображениям кластера составляла $\pm 0,5$ пикс= ± 2 мкм.

Для подсветки кластера использовались светодиоды разных спектров, чаще зеленый (FYL-3014PGC), к которому цифровая камера имела наибольшую чувствительность. Расстояние от светодиода до кластера составляло около 10 мм.

Электрическое напряжение к области левитации кластера прикладывали с помощью вертикального электрода диаметром 0,16 мм, нижний конец которого располагался над поверхностью воды на высоте 2,5-4 мм. В отдельных случаях для повышения точности измерений использовали плоский верхний электрод в виде свитого в плоскую спираль проводника. Внешний диаметр спирали электрода был примерно равен межэлектродному расстоянию. Плоская поверхность воды служила другим электродом. Относительную ошибку определения величины напряженности поля в случае вертикального верхнего электрода оценивали как ± 50 %. Погрешность вычисления напряженности электрического поля в случае плоского верхнего электрода оценивали величиной ± 30 %.

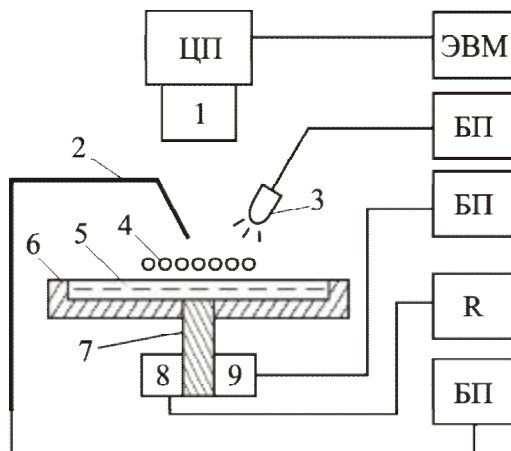


Рисунок 1 - Блок-схема установки для получения кластеров. ЦП – цифровая приставка, ЭВМ – компьютер, БП – блок питания, R – цифровой измеритель сопротивления, 1 – бинокулярный микроскоп, 2 – электрод, 3 – источник света, 4 – кластер, 5 – слой воды, 6 – резиновая ковчета, 7 – теплопроводник $\varnothing=1,6$ мм, 8 – датчик температуры, 9 – нагреватель

Третья глава «Структура и геометрические параметры капельного кластера» содержит два параграфа, посвященные, соответственно, изучению геометрических характеристик капельного кластера и выяснению механизма левитации капель над нагретой поверхностью воды.

На Рисунке 2 приведены фотографии типичного кластера под углами зрения 90° и 30° . На фотографиях видно, что капли воды в капельном кластере образуют однослойную структуру и пространственно упорядочены по отношению друг к другу по типу плоской гексагональной решетки. Для объективного доказательства наличия пространственного упорядочения капель в капельном кластере была построена парная корреляционная функция 27-капельного кластера, Рисунок 3. Для сравнения были построены аналогичные функции фрагмента идеальной плоской гексагональной решетки (27 узлов) и структуры со случайным расположением частиц (27 частиц). Для вычисления данной функции использовали часто цитируемую формулу $(1/r^2)(dN/dr)$, где dN – число пар капель, расстояние между которыми попадает в интервал от r до $r+dr$. В нашем случае было использовано значение $dr=1$ мкм. При построении функций использовали процедуру двукратного сглаживания путем вычисления плавающего среднего по десяти точкам.

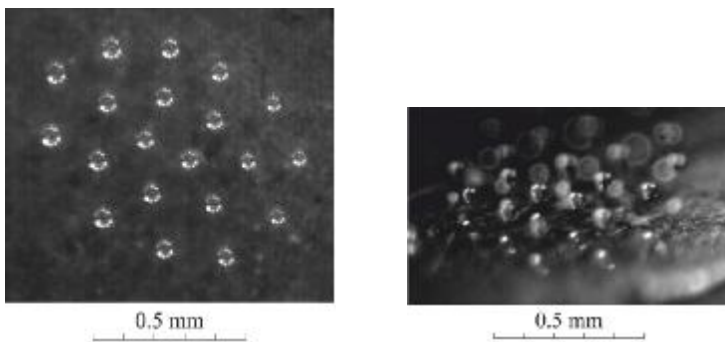


Рисунок 2 - Фотография капельного кластера под углами зрения 90° и 30° при температуре 90°C

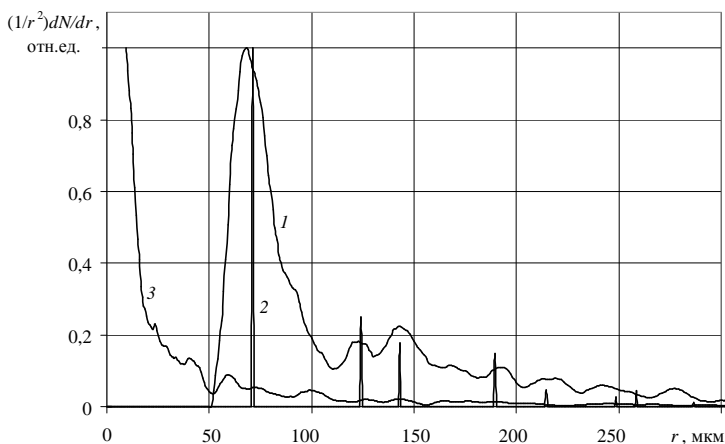


Рисунок 3 - Парные корреляционные функции капельного кластера при температуре 65°C (1), фрагмента идеальной плоской гексагональной решетки (2), структуры со случайным расположением частиц (3)

Корреляционная функция капельного кластера имеет несколько максимумов, которые совпадают с максимумами функции идеальной решетки, что и является объективным свидетельством наличия упорядочения капель в кластере.

С целью охарактеризования динамики изменения размера капель в процессе существования кластера были построены функции распределения капель по диаметрам в различные моменты времени, Рисунок 4. Функцию распределения вычисляли по формуле dN_1/dD , где dN_1 – число капель с диаметрами, попадающими в интервал от D до

$D+dD$ при $dD=1$ мкм. Полученную функцию затем сглаживали путем вычисления плавающего среднего, подобно кривым (1), (3) на Рисунке 3.

Из Рисунка 4 следует, что с течением времени главный максимум функции распределения по диаметрам сдвигается в сторону больших диаметров и уменьшается по ширине. Таким образом, капли в кластере растут, стремясь к равновесному размеру при заданной температуре. Дополнительные опыты также показали, что если температуру кластера начать уменьшать, то равновесный размер капель будет уменьшаться.

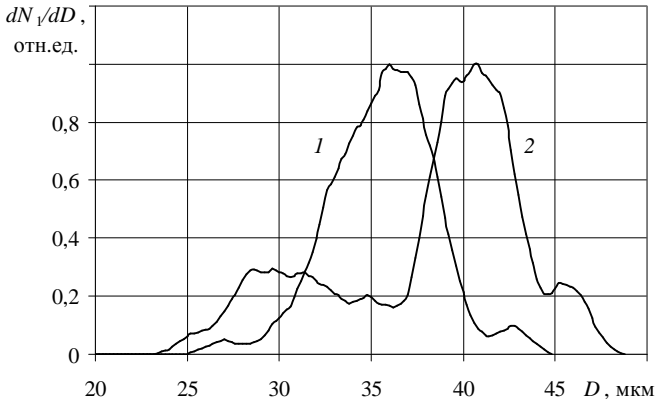


Рисунок 4 - Функции распределения капель по диаметрам D в кластере спустя 30 сек после образования кластера (1) и спустя 40 сек - (2) при температуре 90 С

На Рисунке 5 изображены температурные зависимости равновесных значений межкапельного расстояния L , диаметра D и высоты левитации капель H . Все размеры увеличиваются с ростом температуры. При этом были установлены следующие эмпирические закономерности между L , D , H , показанные на Рисунке 6: $D \approx 1,26H$; $L \approx 4,8H$.

Во втором параграфе главы была проанализирована пригодность гравитационно-стоксовского механизма для описания левитации капель над поверхностью нагретой воды. Для этого было записано условие гравитационно-стоксовского равновесия капли,

$$M \cdot g = F_S = 3 \cdot p \cdot h \cdot v \cdot D \cdot \left(1 + \frac{D}{2 \cdot h_0} \right),$$

в котором сила Стокса F_S

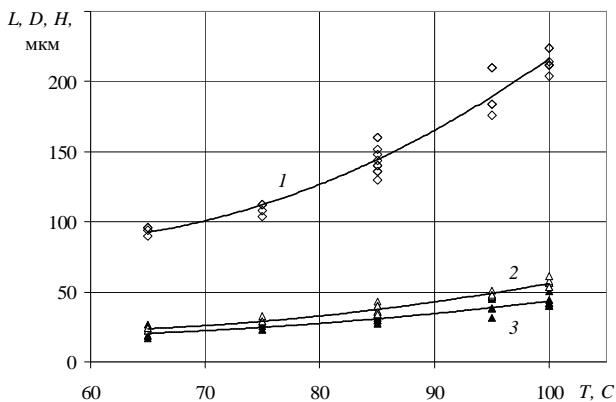


Рисунок 5 - Температурные зависимости межкапельного расстояния L (1), диаметра D (2) и высоты левитации каплей H (3)

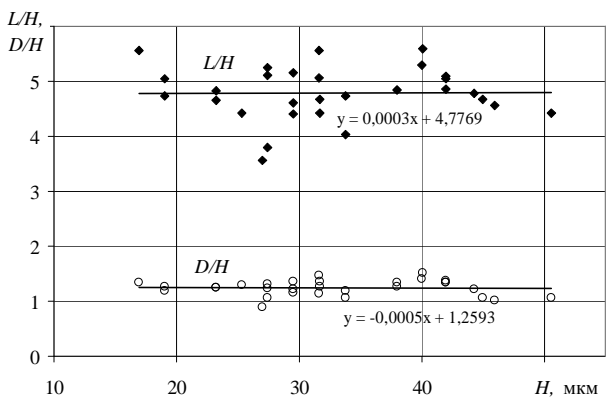


Рисунок 6 - Отношения L/H , D/H при различных значениях высоты левитации H в интервале температур 65-100 С

приблизительно представлена в виде суммы двух асимптотик: 1) силы Стокса, действующей на каплю в свободном ламинарном потоке и 2) силы со стороны потока в случае узкого зазора h_0 между каплями и плоской поверхностью воды, где M - масса капли, g - ускорение свободного падения, η - вязкость пара, v - скорость пара. Из условия равновесия была рассчитана величина зазора h_0 , которую затем сравнили с величиной зазора, найденной в опыте по формуле $h=H-D/2$, обе

представлены на Рисунке 7. (При расчете h_0 полагали, что скорость движения пара v от испаряющейся поверхности воды пропорциональна давлению насыщенного пара над водной поверхностью $P_{\text{нас}}$, в соответствии с законом Дальтона: $v \approx \text{Const} \cdot (P_{\text{нас}} - P) \approx \text{Const} \cdot P_{\text{нас}}$, где P – реальное давление пара над поверхностью ($P \ll P_{\text{нас}}$), $\text{Const} \approx 3,7 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot \text{Па}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Указанное значение константы позволило получить значение скорости пара около 0,03 м/с при температуре нагревателя 95 С, хорошо согласующееся с экспериментальным измерением скорости испарения при данной температуре.) Из Рисунка 7 видно, что расчетные и опытные значения величины зазора хорошо согласуются друг с другом. Это является убедительным свидетельством в пользу гравитационно-стоксовского механизма левитации каплей кластера над подогретой поверхностью воды, от которой поднимается поток пара.

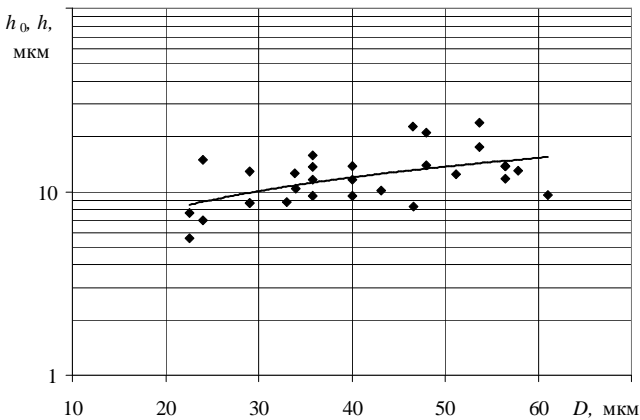


Рисунок 7 - Величина зазора между каплей и поверхностью воды в зависимости от диаметра капли. Сплошная кривая (h_0) – расчет из условия стоксо-гравитационного равновесия, маркеры (h) – результаты опытов

Четвертая глава «Электрические свойства капель воды в капельном кластере» посвящена экспериментальному исследованию электрических свойств капель воды в капельном кластере при различных температурах, проверке пригодности кулоновского механизма левитации каплей над плоской подогретой поверхностью воды, обсуждению механизма межкапельного взаимодействия.

Высота левитации кластера над поверхностью воды и межкапельное расстояние оказались чувствительными к приложению между верхним электродом и поверхностью воды разности потенциалов

1,5 кВ. При этом были замечены два типа поведения капель. Было установлено, что капли, размер которых не достиг равновесного значения при заданной температуре, ведут себя как положительно заряженные частицы: при положительном потенциале на верхнем электроде высота левитации капль уменьшается, а при отрицательном потенциале высота увеличивается, Рисунок 8 (первый тип поведения). По достижении каплями равновесного размера, их поведение в электрическом поле изменяется: высота левитации капль уменьшается как в поле положительной, так и отрицательной полярности, Рисунок 9 (второй тип поведения).

С помощью экспериментальных данных, представленных на Рисунке 8, был вычислен электрический заряд капль. Он составил $z=1,7 \cdot 10^3$ (в единицах элементарного заряда) при температуре $T=95$ С. (Отметим, что такой же порядок величины заряда имеют пылевые частицы сравнимого с каплями размера в пылевой плазме.) Электрический заряд вычисляли по формуле

$$z = \frac{\Delta h}{(h + \Delta h)} \frac{Mg}{\left(1 + \frac{2h}{D}\right) e E_{ex}},$$

вытекающей из совместного решения уравнений гравитационно-стоксовского равновесия в присутствии внешнего электрического поля и без него:

$$Mg = F_S(h),$$

$$Mg = F_S(h + \Delta h) + ezE_{ex}$$

где $F_S(h)$, $F_S(h + \Delta h)$ - силы Стокса, соответственно, в отсутствие и в присутствии внешнего поля E_{ex} , Δh – изменение величины зазора между каплей и поверхностью воды под действием внешнего поля, M – масса капль, g – ускорение свободного падения, e – элементарный заряд.

Различный характер поведения в электрическом поле капль, не достигших равновесного размера при заданной температуре (первый тип поведения) и достигших этого размера (второй тип), был объяснен индуцированием дополнительного заряда капль $z_i = -C \cdot E_{ex}$ под действием внешнего поля, где C - константа. При этом, из совместного решения уравнений гравитационно-стоксовского равновесия в отсутствии поля и в его присутствии следует выражение для относительного изменения величины зазора между каплей и поверхностью воды:

$$\frac{\Delta h}{(h + \Delta h)} = \frac{(1 + 2h/D)}{Mg} \cdot e \cdot (zE_{ex} - CE_{ex}^2).$$

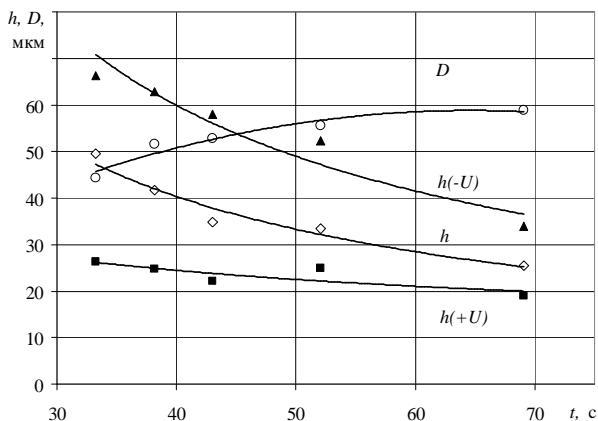


Рисунок 8 - Диаметр D и зазор h между каплей и поверхностью в отсутствии потенциала, $h(-U)$ - зазор в присутствии отрицательного потенциала на верхнем электроде, $h(+U)$ - зазор в присутствии положительного потенциала в различные моменты времени t при $T=95$ С

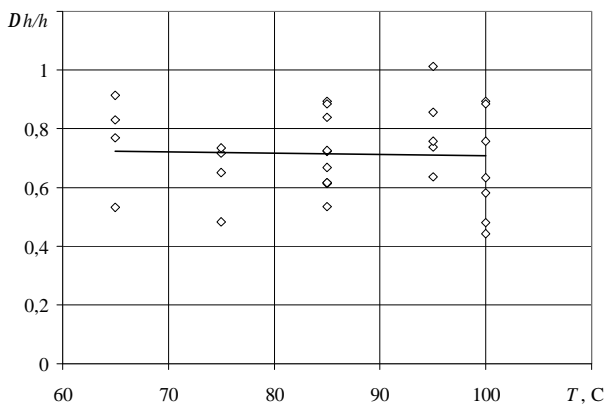


Рисунок 9 - Относительное изменение величины зазора между каплей и поверхностью воды $\Delta h/h$ под действием внешнего электрического поля произвольной полярности при различных температурах T нагревателя

Капли неравновесного размера (первый тип) имеют большой заряд z , обусловленный преобладанием конденсации над испарением на их поверхности. Поэтому, в полученном выражении является наибольшим первое слагаемое в правой части выражения: капля ведет себя в электрическом поле как обычная заряженная частица. Капли

равновесного размера (второй тип) имеют заряд, близкий к нулю, $z=0$, так как для равновесных капель интенсивности испарения и конденсации, заряжающие каплю противоположными знаками заряда, равны друг другу. Поэтому, преобладает второе слагаемое в правой части выражения, пропорциональное $(E_{ex})^2$: величина зазора уменьшается в электрическом поле любой полярности.

Механизм индуцирования электрического заряда z_i капли воды под действием внешнего электрического поля объяснен тем, что ток, текущий сквозь каплю через поверхность, на которой преобладает испарение, выше, чем через поверхность, на которой преобладает конденсация. (У капли равновесного размера в капельном кластере сверху преобладает испарение, а снизу – конденсация.) Поэтому, в поле, направленном вверх, капля заряжается отрицательно и высота ее левитации уменьшается, а в поле, направленном вниз, капля приобретает положительный заряд и высота ее левитации также уменьшается.

С целью выяснения роли кулоновских сил в механизме левитации капель кластера, были выполнены измерения разности потенциалов и тока между паром и водой при испарении в интервале температур воды 40-100 С. Было установлено, что вода несет положительный заряд. Капли неравновесного размера в кластере также положительно заряжены, поэтому, кулоновский механизм может играть определенную роль в левитации. Условие кулоновской левитации имеет вид: $M \cdot g = e \cdot z \cdot E$, где e - элементарный заряд, z - кратность заряда капли, E - электрическое поле заряженной поверхности воды, в котором находится капля. Задача распределения поля и потенциала вблизи поверхности плоского заряда в однокомпонентной плазме имеет известное из литературы аналитическое решение. Согласно этому решению напряженность поля равна $E=10^3$ В/м на характерной для капельного кластера высоте левитации. Из условия кулоновской левитации следует требуемое значение заряда капли $z=4 \cdot 10^6$, в единицах элементарного заряда. В нашем опыте капли имели в тысячу раз меньший заряд $1,7 \cdot 10^3$. Поэтому, кулоновская сила отталкивания капли от поверхности воды в тысячу раз слабее силы, необходимой для левитации. Таким образом, кулоновский механизм оказывается неконкурентоспособным по сравнению с гравитационно-стоксовским.

В четвертой главе были также проанализированы вероятные механизмы межкапельного взаимодействия, способные создать пространственно упорядоченную капельную структуру. В качестве таковых рассматривали известные из литературы а) адвективное течение пара, увлекающее капли к центру нагревателя, б) так называемое «теневое» притяжение капель друг к другу, в) реализацию электрической ловушки для заряженных капель вблизи центра нагревателя, г) притяжение между каплями за счет высокочастотной корреляции объемного заряда в плазме. Наиболее подходящим оказался последний механизм, согласно которому капли должны располагаться на расстоянии

двух радиусов Дебая друг от друга. Для проверки выполнения данного правила в капельном кластере межкапельное расстояние было рассчитано теоретически по формуле $L = 2 \cdot \left(\frac{D}{2} + H \right) + 2 \cdot L_D$. В формуле учтен радиус капли, $D/2$, и толщина плазменной оболочки капли, равная H .

$L_D = \sqrt{\frac{e_0 \cdot k \cdot T}{e^2 \cdot n}}$ – радиус Дебая в паре. Подставляя в L_D аналитическое

значение концентрации $n = \frac{2kTe_0}{e^2 H^2}$ из известной задачи об электрическом

поле плоского заряда в однокомпонентной плазме, получим $L_D = H/\sqrt{2}$. Учитывая также эмпирическое соотношение $D \approx 1,26 \cdot H$ из Рисунка 6, получим $L = 2(H \cdot 1,26/2 + H) + H \cdot \sqrt{2} = 4,7 \cdot H$. Коэффициент пропорциональности в найденной теоретической зависимости, $L = 4,7 \cdot H$, отличается от коэффициента в экспериментальной зависимости, $L \approx 4,8 \cdot H$, представленной на Рисунке 6, на несколько процентов и служит хорошим подтверждением правила расположения капель в кластере на расстоянии двух радиусов Дебая.

Пятая глава «Существование пространственно упорядоченных капельных структур в естественной атмосфере»

Достигнутые результаты исследования капельного кластера были применены для оценки распространенности подобных структур (не только двумерных, но и трехмерных) в природе. В первую очередь была проанализирована возможность существования таких структур в облаках и туманах, поскольку их наличие могло бы повлиять на тепло- и массоперенос в нижних слоях атмосферы и на формирование погоды и климата на Земле.

Для проверки возможности существования упорядочения капель в облаках, значение облачной концентрации капель, взятое из справочной литературы, было сравнено с рассчитанным значением концентрации для идеальной упорядоченной капельной структуры, в которой капли располагаются на расстоянии двух радиусов Дебая друг от друга. При характерной для облака электропроводности $\lambda_0 = 10^{-11}$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$ и подвижности легких носителей $\mu = 10^{-4}$ м 2 В $^{-1}$ с $^{-1}$ радиус Дебая составил $L_D \approx 10^{-3}$ м. Тогда концентрация должна быть равна $N = (2L_D)^{-3} \approx 10^8$ м $^{-3}$. В реальных облаках средняя концентрация капель равна близкой величине $N = 3 \cdot 10^8$ м $^{-3}$, в туманах - $N = (1 \div 6) \cdot 10^8$ м $^{-3}$. Таким образом, капли в облаках и туманах, действительно могут быть пространственно упорядочены, поскольку межкапельное расстояние в них близко к двум радиусам Дебая.

В главе был оценен коэффициент поверхностного натяжения облака, и было показано, что при рассчитанном значении коэффициента поверхностного натяжения поверхность облака устойчива к характерным

для облака сдвиговым течениям при размере облака, не превышающем нескольких десятков метров. При большем размере развивается неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, поверхность приобретает шероховатость с характерным размером в несколько десятков метров, что не находится в большом противоречии с наблюдениями.

В пятой главе был также рассмотрен механизм влияния упорядоченных капельных структур на теплоперенос в атмосфере. Этот механизм заключается в увеличении вязкости водного аэрозоля при возникновении в нем капельного упорядочения. Увеличение вязкости уменьшает числа Релея и Рейнольдса и снижает вероятность развития конвекции и турбулентности в атмосфере, что решающим образом может сказаться на уменьшении скорости теплопереноса. Возможность увеличения вязкости водного аэрозоля была доказана в литературе в экспериментах по сдвиговому течению капельного кластера. Согласно этим экспериментам, капельный кластер ведет себя как неньютоновская жидкость. Его вязкость возрастает при уменьшении относительной скорости сдвига капельных рядов. При скорости сдвига менее 10^{-5} м/с (градиент скорости $0,1 \text{ с}^{-1}$) вязкость кластера становится на порядок выше вязкости воздуха.

В пятой главе описаны примеры наблюдения реальных капельных структур в трехмерном водяном тумане. С помощью видеосъемки продемонстрированы длительно существующие (не менее 0,5 с) структуры из капель воды в виде цепочек, шестиугольников и других, более сложных структурных образований, в тумане при 30 С. При температуре близкой к 100 С методом осаждения капель на холодную подложку также выявлено существование капельных цепочек в тумане.

Вязкость упорядоченной капельной среды должна, очевидно, зависеть от заряда капель. В грозовых облаках размер и заряд капель может быть большим. Размер и заряд ледяных кристаллов может быть еще более существенным. Поэтому, в грозовых облаках можно ожидать наибольшего отклонения теплофизических свойств воздушнокапельной среды от свойств воздуха.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы, достигнутые при исследовании по теме «Физические свойства упорядоченного водного аэрозоля – капельного кластера».

1. Выполнен обзор литературы по теме исследования. Изложены современные научные представления о механизмах образования и роста капель воды в атмосфере, описаны процессы образования облаков, отмечена их исключительно важная роль в формировании климата Земли. При этом было отмечено, что малоизученным осталось явление образования пространственно упорядоченных структур из капель воды в аэрозолях. Подобные структуры, обладая вязкостью, более высокой, чем вязкость воздуха, могут играть важную роль в формировании облаков и

влиянии на циркуляцию атмосферы. На основании обзора литературы была сформулирована цель диссертационного исследования.

2. Для достижения цели диссертационного исследования была создана экспериментальная установка и разработан комплекс экспериментальных методик, в том числе методик получения капельного кластера, регистрации температуры, создания подсветки кластера, приложения электрического поля к капельному кластеру, измерения межфазного электрического тока и потенциала при испарении воды, регистрации изображений и измерения диаметра капель, межкапельного расстояния и высоты левитации капель над поверхностью воды.

3. Получены капельные кластеры в интервале температур 65-100 С. Измерены координаты капель и вычислена их парная корреляционная функция, объективно доказывающая наличие пространственного упорядочения капель в кластере по типу плоской гексагональной решетки. На основании вычисленной функции распределения капель по размерам в различные моменты времени показано стремление размеров капель к равновесному значению при заданной температуре. Получены температурные зависимости равновесного диаметра капель, высоты левитации и межкапельного расстояния. Установлены эмпирические закономерности между данными параметрами: $D \approx 1,26H$; $L \approx 4,8H$. Показано, что гравитационно-стоксовский механизм левитации капель кластера удовлетворительно описывает наблюдаемую в опытах величину зазора между каплями и плоской поверхностью нагретой воды.

4. Впервые обнаружено два типа поведения капель капельного кластера во внешнем электрическом поле. Капли, не достигшие равновесного размера при заданной температуре, вели себя как положительно заряженные частицы (первый тип поведения): они увеличивали или уменьшали высоту левитации в соответствии со знаком поля. Капли, достигшие равновесного размера, уменьшали высоту левитации при любой полярности приложенного поля (второй тип поведения). Предложена математическая модель для описания обоих типов поведения капель, в частности, разработан механизм индуцирования дополнительного заряда капель внешним электрическим полем.

5. Измерены изменения высоты левитации капель в электрических полях различной полярности в широкой области температур. На основании экспериментальных данных рассчитан заряд капель, составивший $1,7 \cdot 10^3$ единиц элементарного заряда. Численной проверкой кулоновского механизма левитации капель капельного кластера над поверхностью воды показана его неконкурентоспособность по сравнению с гравитационно-стоксовским механизмом. На основании экспериментальных данных было доказано, что капли воды в капельном кластере располагаются на расстоянии двух радиусов Дебая друг от друга. Таким образом, был подтвержден механизм межкапельного

взаимодействия, основанный на конкуренции сил кулоновского отталкивания одноименно заряженных капель и сил притяжения за счет высокочастотных корреляционных процессов носителей заряда в паре. Были также проанализированы альтернативные механизмы межкапельного взаимодействия, которые оказались несущественными для описания свойств кластеров.

б. А) Оценена возможность распространения упорядоченных капельных структур в атмосферных облаках и туманах. Для этого было показано, что средняя концентрация капель воды в атмосферных облаках и туманах совпадает по порядку величины с расчетной концентрацией для гипотетической пространственно упорядоченной капельной структуры, в которой капли располагаются на расстоянии двух радиусов Дебая друг от друга. Б) Рассчитан коэффициент поверхностного натяжения облака в предположении, что в нем существуют упорядоченные капельные структуры. С помощью критерия Кельвина-Гельмгольца оценена устойчивость поверхности облака к сдвиговому течению. Показано, что вследствие развития неустойчивости поверхность облака может приобретать шероховатость с характерным размером в несколько десятков метров. Такой размер шероховатости не противоречит результатам наблюдений. В) Предложен механизм влияния упорядоченных капельных структур на тепломассоперенос в атмосфере. Влияние осуществляется через увеличение вязкости воздуха при возникновении капельных структур и подавлении конвективного движения в атмосфере. Г) С помощью фото и видеосъемки трехмерного лабораторного тумана, а также методом осаждения капель тумана на подложку и последующей фоторегистрации, продемонстрировано существование в тумане упорядоченных структур в виде капельных цепочек, плоских шестиугольников и других более сложных структурных образований, что подтверждает существование упорядоченных водных аэрозолей в земной атмосфере.

Подписано в печать 8 ноября 2013 года
Заказ 100. Тираж 100 экз. П.л. 1,2
Отпечатано в ФГБУ ИКЗ СО РАН
Г.Тюмень, ул. Малыгина, 86