

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Дробление по типу «парашют» как механизм образования брызг при ураганных ветрах и
его роль в процессах обмена между океаном и атмосферой»**

Аспирант: Козлов Дмитрий Сергеевич

(подпись аспиранта)

Научный руководитель: Троицкая Юлия Игоревна,
доктор физико-математических наук, заведующая
отделом 230

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:

05.06.01 Науки о Земле

Направленность (профиль) подготовки:

25.00.29 Физика атмосферы и гидросферы

Форма обучения: очная

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации. Поток импульса, тепла и влаги в атмосферном пограничном слое над морской поверхностью определяют энергетический баланс между атмосферой и океаном. Изучение этих потоков имеет важное прикладное значение для задач моделирования климата, прогнозирования погоды и построения моделей ураганов. В настоящее время, в основе большинства современных приложений для количественной оценки поступающих в атмосферу потоков лежит их параметризация на основе балк-формул [1],[2]. Однако такой подход имеет ряд ограничений, в первую очередь связанных с погрешностью экспериментальных данных, на основе которых эта параметризация была получена. Особенно существенным разброс данных становится при сильном и ураганном ветрах [3],[4], что обусловлено трудностью проведения измерений при таких условиях.

В связи с этим, для ураганных условий на протяжении длительного времени использовалась экстраполяция зависимостей коэффициентов обмена, полученных при умеренных скоростях ветра. Согласно такому подходу, коэффициент аэродинамического сопротивления поверхности воды должен расти [1] при скоростях ветра, превышающих 10 м/с. Однако современные исследования этого вопроса демонстрируют либо тенденцию к насыщению значения коэффициента аэродинамического сопротивления при ураганных скоростях ветра в лабораторных условиях [5], либо немонотонную зависимость при натуральных условиях [4],[6],[7]. Результаты теоретического исследования [8] также указывают на отличие поведения коэффициента аэродинамического сопротивления от линейного. В этой работе была построена модель тропического циклона, в рамках которой на основе баланса поступающей и диссипирующей в атмосферу энергии была получена оценка максимальной скорости ветра в урагане. В [8] показано, что использование экстраполяции коэффициентов обмена на ураганные ветры приводит к тому, что максимальная скорость ветра в тропическом циклоне ограничивалась бы значениями 30-40 м/с, в то время как наблюдения за реальными ураганами демонстрируют существование более интенсивных тропических циклонов. В заключение [8] автор указывает, что для того чтобы модели тропических циклонов были способны описать развитие и поддержание интенсивных ураганов отношение коэффициента переноса энтальпии к коэффициенту аэродинамического сопротивления должно превышать 0.75. Обеспечить такое значение в действительности может не только снижение коэффициента сопротивления при штормовых скоростях ветра, но и увеличение потока энтальпии. В качестве возможной причины, приводящей к обоим этим эффектам, можно рассматривать морские брызги.

При штормовых значениях скорости ветра обрушение волн приводит к тому, что приподнятый слой атмосферы насыщен морскими брызгами. Число капель резко растет с увеличением скорости ветра [9],[10], поэтому можно ожидать, что при штормовых ветрах их

присутствие может привести к радикальным изменениям процессов обмена, происходящих на границе атмосферы и океана. Характерный размер морских капель варьируется от 10 нм до нескольких мм [11]. Крупные капли с размерами от 10 мкм до единиц миллиметров после вылета с поверхности воды осаждаются под действием силы тяжести в океан, тем самым осуществляя прямой обмен массой, теплом и импульсом между атмосферой и океаном. Повышенный интерес к каплям с радиусом более 100 мкм связан с тем, что именно крупные брызги определяют объёмный поток [10], поступающий в атмосферу, который, в свою очередь, масштабирует удельный вклад капель данного радиуса в общий поток.

Изучение влияния морских брызг на поступающие в атмосферу потоки имеет более чем 40-летнюю историю, начиная с работ [9],[12]–[14]. Одним из ключевых моментов необходимых для количественных оценок этих процессов является изучение механизмов, приводящих к уносу капель с поверхности воды. Схожий процесс совместного течения пленки жидкости и высокоскоростного потока газа, часто встречающийся в промышленных устройствах (абсорберах, химических реакторах, парогенераторах), неоднократно исследовался в лабораторных экспериментах [15],[16]. Однако важным фактором, отличающим движение воздуха в атмосфере над морской поверхностью от газожидкостного течения тонких пленок в каналах, служит обрушение крупных ветровых волн. При обрушении волны происходит захват воздуха, в результате чего образуются подводные пузыри, которые всплывают и лопаются. Кроме того углубление, оставшееся после лопнувшего пузыря, коллапсирует и образует струю, которая также приводит к появлению капель. Эти механизмы генерации брызг детально изучены в работах [17]–[25]. В случае, когда скорость ветра достаточно велика, появляется новый тип брызг – капли, которые срываются с гребней обрушающихся волн под действием касательного напряжения. Одной из первых экспериментальных работ, посвященной изучению генерации таких капель, является статья [26]. В ней сообщается, что в районе гребней обрушающихся волн образуются небольшие выступы воды, которые вытягиваются в жидкие «пальцы» и впоследствии дробятся на отдельные капли.

В дополнение к уже указанным источникам капель в недавних лабораторных исследованиях [27] продемонстрировано существование нового механизма генерации брызг – дробление по типу «парашют». Анализ снимков поверхности воды, выполненный в [27], показал, что на гребнях обрушающихся волн появляются некоторые слои жидкости, которые надуваются воздушным потоком и лопаются как пузыри, образуя брызги. Кроме того авторы указывают, что при больших скоростях ветра такой режим образования капель встречается часто.

Каждый из указанных механизмов вносит свой вклад в итоговую функцию генерации брызг, которая характеризует распределение капель по размеру, вылетевших в единицу времени с единицы площади. Однако трудности проведения прямых измерений в условиях урагана и

недостаточное понимание механизмов образования капель приводят к значительному разбросу значений функции генерации брызг [10],[11] (до шести порядков) и, как следствие, неопределенности при оценке влияния морских брызг на процессы обмена в пограничном слое.

Лабораторное исследование механизмов генерации брызг [28] позволило выделить дробление по типу «парашют» как наиболее эффективный источник крупных капель при ураганных скоростях ветра.

Таким образом, возникает необходимость более детального изучения механизма генерации брызг по типу «парашют». В рамках этого исследования нужно не только получить статистику «парашютов» и оценить количество генерируемых при этом капель, но также изучить факторы, отвечающие за образование «парашютов». Поскольку конечная цель – это количественная оценка вклада капель в процесс обмена импульсом, теплом и влагой между океаном и атмосферой, также требуется детально изучить изменение параметров капли от момента инъекции до падения обратно в воду.

Цели диссертационной работы. В соответствии с изложенными выше проблемами, основной целью диссертационной работы является изучение особенностей процесса генерации морских брызг при ураганных ветрах и оценка влияния капель на процессы обмена между океаном и атмосферой. При этом особое внимание уделяется изучению фрагментации по типу "парашют", поскольку именно этот механизм образования капель является основным при ураганных скоростях ветра. Для реализации этого предполагалось решить следующие задачи:

1. Исследовать механизмы генерации брызг, определить статистические характеристики явлений, приводящих к образованию капель, построить функцию генерации брызг.
2. Изучить временную эволюцию температуры и радиуса одиночной капли.
3. Получить оценки потоков импульса и тепла, обусловленных каплями.
4. Построить теоретическую модель формирования начальных возвышений водной поверхности, инициирующих дробление по типу «парашют».

Научная новизна диссертационной работы определяется полученными в ней оригинальными результатами:

1. На основе лабораторных экспериментов выполнена классификация событий, приводящих к образованию брызг, и показано, что основным источником крупных капель, срываемых с гребней волн, при ураганных ветрах является дробление по типу «парашют».
2. Изучена зависимость статистических характеристик «парашютов» от скорости ветра и развита феноменологическая модель, описывающая статистику числа событий дробления по типу «парашют».
3. Построена функция генерации брызг, образованных при фрагментации по типу «парашют».

4. Предложена уточненная параметризация зависимости радиуса и температуры одиночной капли морской воды от времени, которая позволяет описать более интенсивное испарение, происходящее на начальном этапе. Более резкое изменение радиуса в начальный момент времени связано с отличием температуры капли от её равновесного значения.

5. Для условий тропического циклона получены оценки потоков импульса, энтальпии, скрытого и явного тепла, обусловленных брызгами, на основе которых были рассчитаны коэффициенты аэродинамического сопротивления поверхности воды и переноса энтальпии.

6. Предложена и исследована модель возмущения, приводящего к инициации дробления по типу «парашют».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Дробление по типу «парашют» является наиболее эффективным источником крупных капель при ураганных скоростях ветра.

2. Построенная функция генерации брызг, обусловленных дроблением по типу «парашют», хорошо согласуется с имеющимися лабораторными и натурными данными о статистике капель при ураганных ветрах.

3. Дополнительный поток импульса, связанный с событиями дробления по типу «парашют», а также учёт стратификации, создаваемой брызгами, приводит к немонотонной зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления поверхности воды от скорости ветра.

4. Для условий характерных для тропического циклона поток энтальпии, связанный с каплями, при скоростях ветра более 45-50 м/с может превышать турбулентный поток от поверхности океана.

5. Резонансное трёхволновое взаимодействие возмущений дрейфового течения может рассматриваться в качестве механизма формирования начальных возмущений водной поверхности, развитие которых приводит к дроблению по типу «парашют».

Достоверность полученных результатов

Полученные результаты обладают высокой степенью достоверности, поскольку большая часть работы представляет собой теоретическое исследование, основанное на воспроизводимых экспериментальных данных. Характерные величины потоков массы, импульса и тепла, которые были найдены в рамках этой работы, находятся в согласии с данными лабораторных и натуральных измерений других исследований. По результатам, представленным в диссертации, опубликовано

ряд статей в ведущих отечественных и зарубежных журналах. Основные положения диссертации неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях, обсуждались на семинарах в ИПФ РАН.

Научная и практическая значимость результатов работы

Результаты, полученные в работе, могут использоваться для исследования деталей взаимодействия океана и атмосферы при ураганных скоростях ветра. Предложенные в диссертации параметрические зависимости коэффициентов сопротивления морской поверхности и переноса энтальпии от скорости ветра могут применяться в численных моделях тропических циклонов и прогнозировании погоды. Разработанная уточнённая модель временной эволюции параметров одиночной капли может выступать в качестве замены предшествующей, поскольку оценки потоков скрытого и явного тепла, полученные на ее основе, лучше согласуются с результатом численного моделирования исходных уравнений, чем при использовании предыдущей модели. Кроме того проведенный анализ уравнений микрофизики капли может рассматриваться в качестве первого этапа при изучении процесса кристаллизации жидких частиц, который часто встречается в промышленности (производство лекарств, снежная пушка) и в природных условиях (северные широты). Трёхволновое резонансное взаимодействие, описанное в рамках диссертации, на данный момент является единственной разработанной гипотезой, объясняющей процесс образования начальных возмущений поверхности воды, из которых формируются «парашюты».

Апробация работы

Диссертационная работа выполнена в Институте прикладной физики РАН. Результаты диссертации были использованы в рамках грантов РФФИ, проектов РНФ и Минобрнауки России, гранта Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Основные положения и результаты работы докладывались:

- на международных конференциях: European Geosciences Union General Assembly (2016, 2018, 2019, 2020 и 2021 гг.).
- на российских конференциях: 26-ая Нижегородской сессии молодых ученых (секция «Физика»), 25-ая Нижегородской сессии молодых ученых (секция «Физика»), 24-ая Нижегородской сессии молодых ученых (секция «Физика»), XXXII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова (секция «Гидродинамические волны и течения»).
- на семинарах и конкурсах ИПФ РАН.

Личный вклад автора. Все приведенные в диссертации результаты получены либо автором, либо при его непосредственном участии. Автор диссертации принимал активное участие в обработке видеозаписей высокоскоростной съёмки поверхности воды. Программное обеспечение для расчета временной эволюции параметров капель, получения и численного решения системы уравнений, описывающей трёхволновое резонансное взаимодействие возмущений ветрового дрейфового течения в воде, было разработано автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, цитируемой литературы и списка работ автора по теме работы. Объем диссертации составляет 139 страниц, включая 61 рисунок. Список литературы содержит 112 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются её цели, кратко излагается содержание диссертации.

В **Главе 1** приведен обзор исследований, посвященных изучению процессов взаимодействия океана и атмосферы, причем особое внимание уделяется эффектам, связанным с каплями.

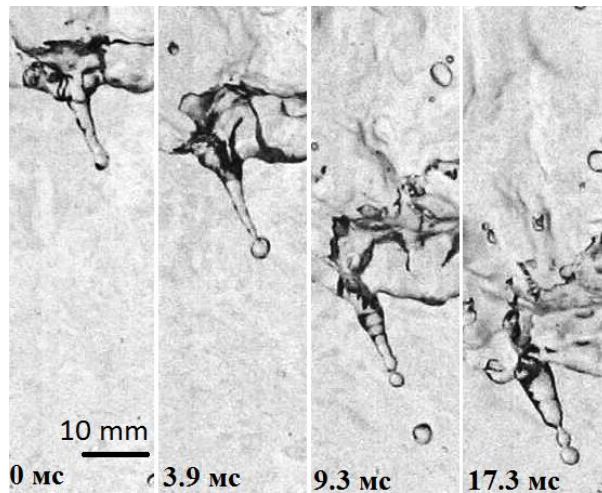
В разделе 1.2 подробно описаны механизмы генерации капель, а также дано определение функции генерации брызг. В разделе 1.3 обсуждаются детали эволюции капли морской воды, попавшей в атмосферу, и приведён пример характерной динамики её радиуса и температуры. В разделе 1.4 описана концепция «вернувшихся» капель, в рамках которой на основе сохранения энтальпии в столбе, включающем в себя верхний слой жидкости и нижний слой атмосферы, было показано, что за счёт эффектов, связанных с брызгами, энтальпия атмосферы растёт, причём основной вклад вносят крупные капли.

Основные понятия, описывающие процессы переноса, происходящие в приводном пограничном слое атмосферы, представлены в разделе 1.5. Также приведены результаты как лабораторных, так и натурных исследований коэффициентов переноса для широкого диапазона скоростей ветра, включая экстремальные, в разделе 1.6. На примере модели тропического циклона, представленной в разделе 1.7, показана важность изучения деталей взаимодействия атмосферы и океана при ураганных скоростях ветра. Обсуждение различных эффектов, влияющих на перенос тепла и импульса между водой и воздухом, представлено в разделе 1.8.

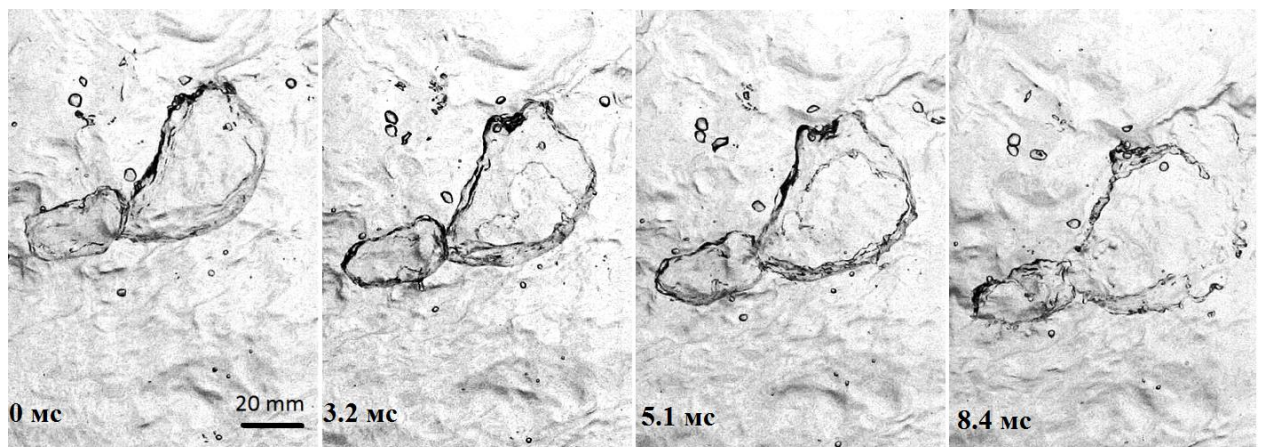
В заключительном разделе 1.9 был сделан вывод о направлении необходимых исследований. Ключевым фактором необходимым для количественных оценок роли капель в процессе взаимодействия атмосферы и океана является функция генерации брызг, описывающая количество капель, которые вылетели с поверхности воды в единицу времени с единицы площади. В то же время экспериментальные данные о статистике капель в разных наблюдениях

могут отличаться на шесть порядков. Такая неопределенность связана как с трудностями проведения исследований при ураганных скоростях ветра, так и недостаточным пониманием механизмов их генерации. В связи с этим возникает необходимость лабораторных и теоретических исследований, в первую очередь, направленных на изучение явлений, приводящих к генерации брызг.

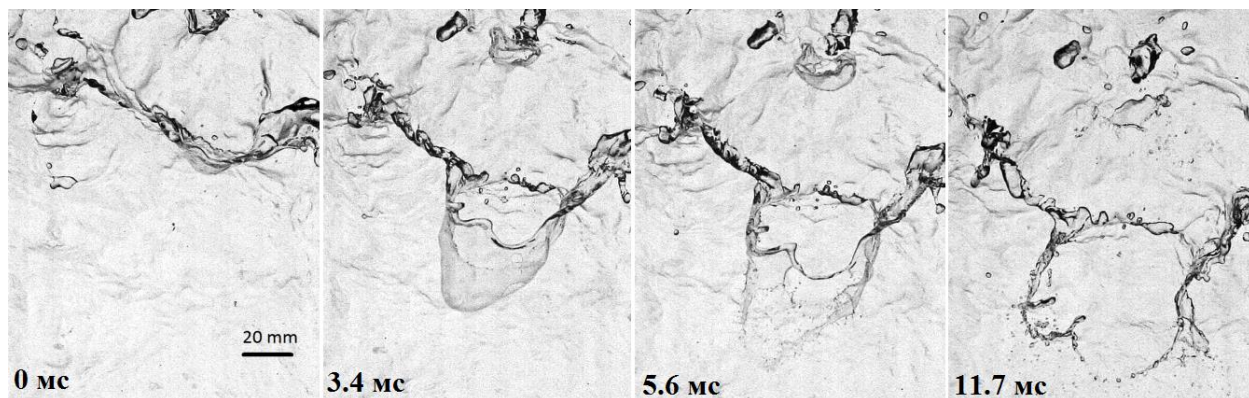
Глава 2 посвящена исследованию механизмов генерации брызг при ураганных скоростях ветра на основе данных лабораторных измерений, проведенных на базе ветро-волнового канала бассейна ИПФ РАН. Описание устройства и характеристик экспериментальной установки представлено в [разделе 2.2](#). В рамках этих экспериментов велась съёмка границы раздела воды и воздуха с двух ракурсов. На основе данных видеосъёмки в [разделе 2.3](#) дана классификация основных явлений, приводящих к генерации капель, при ураганных скоростях ветра (Рис. 1): дробление жидких «нитей», разрыв крупных подводных пузырей и дробление по типу «парашют».



(a)



(б)



(в)

Рис. 1. Основные механизмы генерации брызг: (а) - образование и дробление жидкой «нити», (б) - разрыв большого пузыря, (в) - образование и разрыв одиночного «парашюта». $U_{10} = 25$ м/с.

С помощью специально разработанного программного обеспечения была проведена обработка кадров видеозаписей и исследована статистика, событий приводящих к генерации брызг. Согласно результатам данного анализа, представленным в [разделе 2.4](#), дробление по типу «парашют» является доминирующим источником брызг при ураганных скоростях ветра (Рис. 2). Помимо статистики событий дробления по типу «парашют» с помощью полуавтоматической обработки также были получены распределение начального и конечного радиуса «парашютов», скоростей их краев и центров, а также время их жизни.

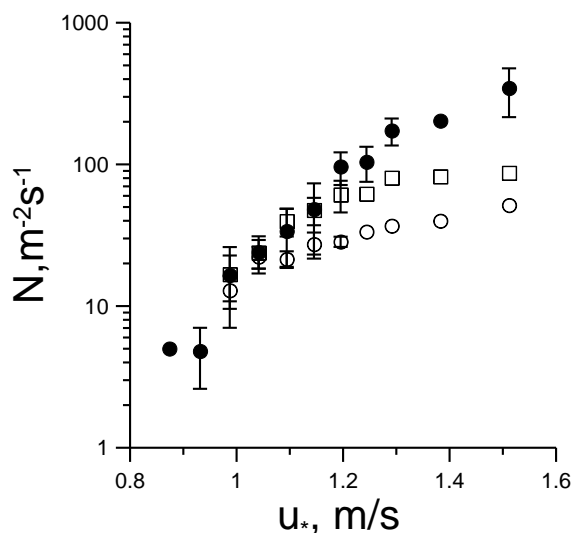


Рис. 2. Зависимость удельного (в единицу времени на единицу площади) числа событий образования брызг от динамической скорости ветра: открытые кружки - разрыв всплывающих пузырей, квадраты – жидкие «нити», заштрихованные кружки – дробление по типу «парашют».

[Раздел 2.5](#) посвящен построению функции генерации брызг, образованных в результате дробления по типу «парашют». Использована модель, согласно которой генерация брызг при

одном событии фрагментации обусловлена двумя механизмами: разрывом плёнки купола «парашюта» и дроблением его ободка. Распределение капель, образованных при разрыве пленки купола «парашюта», по размеру находилось на основе аналогии этого процесса с механизмом генерации брызг за счёт разрывов подводных пузырей, который был детально исследован в [23]. Для оценки числа капель, возникших в результате дробления ободка «парашюта», предполагалось, что ободок является жидкой «нитью» некоторой толщины, определяемой радиусом «парашюта» R . Дробление жидких «нитей» исследовано в [22]. Итоговая функция генерации брызг представляет собой свёртку распределения «парашютов» по размеру и функции распределения брызг от одного явления. Построенная таким образом функция генерации хорошо согласуется с имеющимися результатами лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений о статистике капель при ураганных ветрах (Рис. 3).

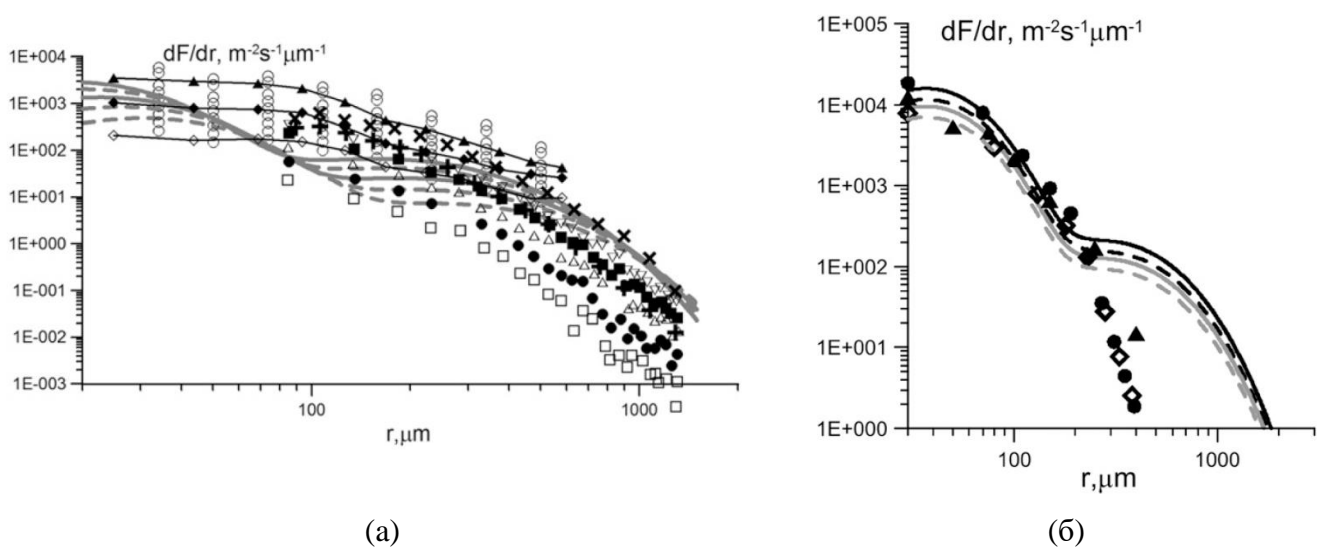


Рис. 3. Сравнение функций генерации брызг, образованных при дроблении по типу «парашют», и экспериментальных измерений: проведенных в лабораторных условиях – (а), в натуральных условиях – (б). Пунктирные и сплошные линии без символов – функция генерации, построенная в рамках данной диссертации, символы – экспериментальные данные.

В разделе 2.6 приводится заключение ко второй главе, в котором обсуждается возможное влияние крупных капель, образованных при дроблении ободка «парашюта», на процесс переноса между океаном и атмосферой.

На основе разработанной функции генерации брызг в **Главе 3** получены оценки потоков, связанных с явлением дробления по типу «парашют».

В разделе 3.2 получены оценки дополнительного потока импульса, связанного с дроблением по типу «парашют». А именно, показано, что влияние «парашютов» на аэродинамическое сопротивление определяется вкладом трёх факторов. Первый эффект связан с сопротивлением, которое оказывают купола «парашютов», выступающие в качестве препятствий

для приповерхностного потока ветра. Вклад этого эффекта в касательное напряжение оценивался как

$$F_{Mb} = 4\pi\sigma \langle \bar{R}\tau \rangle \langle N \rangle, \quad (1)$$

где $\langle N \rangle$ - среднее число «парашютов», $\langle \bar{R}\tau \rangle$ - среднее от их радиуса и времени жизни, σ - коэффициент поверхностного натяжения воды. Второй эффект был обусловлен ускорением воздушным потоком капель в процессе их генерации, касательное напряжение от которого определялось как

$$F_{Md} = \rho_w \langle u_1 \rangle \int_0^\infty \frac{4\pi r^3}{3} \frac{dF(r, u_*)}{dr} dr, \quad (2)$$

где $\frac{dF(r, u_*)}{dr}$ - функция генерации брызг, $\langle u_1 \rangle$ - средняя скорость краёв «парашютов», ρ_w - плотность воды. Помимо указанных факторов также учитывалось влияние устойчивой стратификации приподнятого слоя атмосферы, обусловленной присутствием взвешенных капель. Учёт капель приводит к модификации профиля средней скорости, на основе которого было получено выражение для коэффициента аэродинамического сопротивления поверхности воды с учётом стратификации в виде:

$$C_D = \frac{C_{DN}}{\left(1 + \frac{b\rho_w g}{\rho_a u_*^3} \sqrt{C_{DN}} \int_{z_s}^\infty \langle sw \rangle dz \right)^2}, \quad (3)$$

где C_{DN} и C_D - коэффициенты аэродинамического сопротивления для нейтрально стратифицированного атмосферного пограничного слоя и для случая, когда учитывается стратификация, создаваемая каплями, $b=5$ (см. [29]), ρ_a - плотность воздуха, g - ускорение свободного падения, $\langle sw \rangle$ - поток объёмной концентрации капель.

Комбинация этих факторов приводит к немонотонной зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от скорости ветра (Рис. 4).

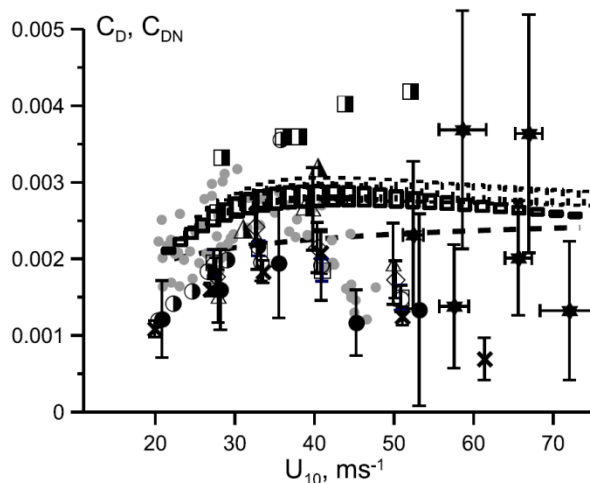


Рис. 4. Коэффициент аэродинамического сопротивления поверхности в зависимости от U_{10} , полученный в рамках указанной модели. Пунктирными рамками показаны оценки $C_{DN}(U_{10N})$ для случая нейтрально стратифицированного атмосферного пограничного слоя, сплошными рамками показаны оценки $C_D(U_{10})$ для случая, когда учитывается влияние капель на стратификацию приводного слоя атмосферы. Высота рамок отображает изменения Ω от 2.5 до 3.5. Экспериментальные данные показаны символами. Пунктирная кривая изображает C_D из [30].

Для оценки влияния капель на потоки тепла, поступающие в атмосферу, в разделе 3.3 была разработана усовершенствованная параметризация эволюции параметров капли от времени в следующем виде:

$$\begin{aligned} T(t) &= T_{eq} + T_r e^{-t/\tau_r} + T_T e^{-t/\tau_T}, \\ r(t) &= r_{eq} + r_r e^{-t/\tau_r} + r_T e^{-t/\tau_T}. \end{aligned} \quad (4)$$

где T_{eq}, r_{eq} - равновесные значения радиуса и температуры капли, τ_T, τ_r - характерные временные масштабы эволюции радиуса и температуры. Аппроксимация (4) позволяет практически точно описать поведение радиуса и температуры капли, в том числе резкое изменение радиуса, происходящее на начальном этапе (Рис. 5). Физически это более интенсивное испарение связано с тем, что капля в начальный момент более горячая, чем после достижения равновесной температуры.

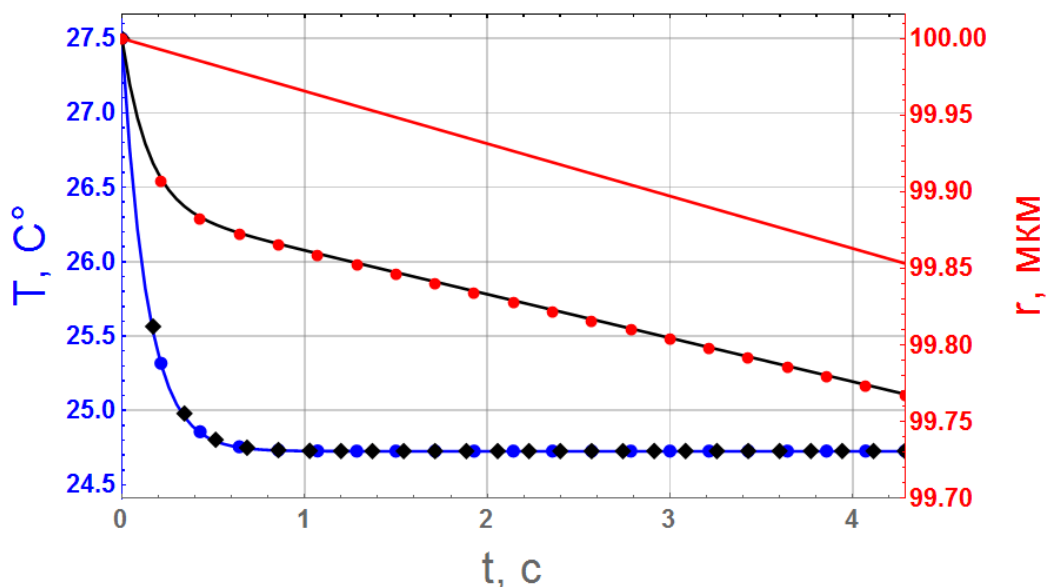


Рис. 5. Эволюция радиуса и температуры капли за время падения $\tau_f \approx 4.3$ с. Кружками показан результат численного решения уравнений микрофизики капли, сплошная кривая – параметризация Андреаса [31]. Сплошная черная линия и чёрные ромбы изображают эволюцию радиуса и температуры, рассчитанные на основе предложенной параметризации (4). Параметры

среды: $T_w = 27.5^\circ C$ – температуры воды, $T_a = 25^\circ C$ – температура воздуха, $RH = 96\%$ – относительная влажность.

С помощью параметризации (4) на основе уравнения теплового баланса капли было получено выражение, описывающее количество энтальпии, которое поступает в атмосферу от одиночной капли за её жизненный цикл, в виде

$$Q_K = c_w \{ m_0 (T_w - T_{eq}) + m(\tau_f) (T_{eq} - T(\tau_f)) \}, \quad (5)$$

где Q_K - количество энтальпии от одной капли, c_w - удельная теплоёмкость воды, m_0 , $m(\tau_f)$ - начальная и конечная массы капли, T_w , $T(\tau_f)$ - начальная и конечная температуры капли, T_{eq} - равновесное значение температуры. Скрытая теплота, которую передаёт одиночная капля атмосфере вследствие испарения, рассчитывалась как

$$Q_L = L_v (m_0 - m(\tau_f)), \quad (6)$$

где L_v - удельная теплота парообразования воды. Поскольку энтальпия равна сумме скрытого и явного тепла, количество явного тепла находилось как

$$Q_S = Q_K - Q_L. \quad (7)$$

Для оценки общих потоков от всех капель необходимо вклад от одной капли умножить на функцию генерации брызг и проинтегрировать по всем радиусам. Зависимость интегральных потоков тепла от скорости ветра показана на рис. 6. Согласно полученным оценкам, для условий характерных для тропического циклона поток энтальпии, связанный с каплями, в основном определяется потоком скрытого тепла, а поток явного тепла мал и является отрицательной величиной. Также было показано, что при скоростях ветра более 45-50 м/с поток энтальпии от капель может превышать турбулентный поток от поверхности океана.

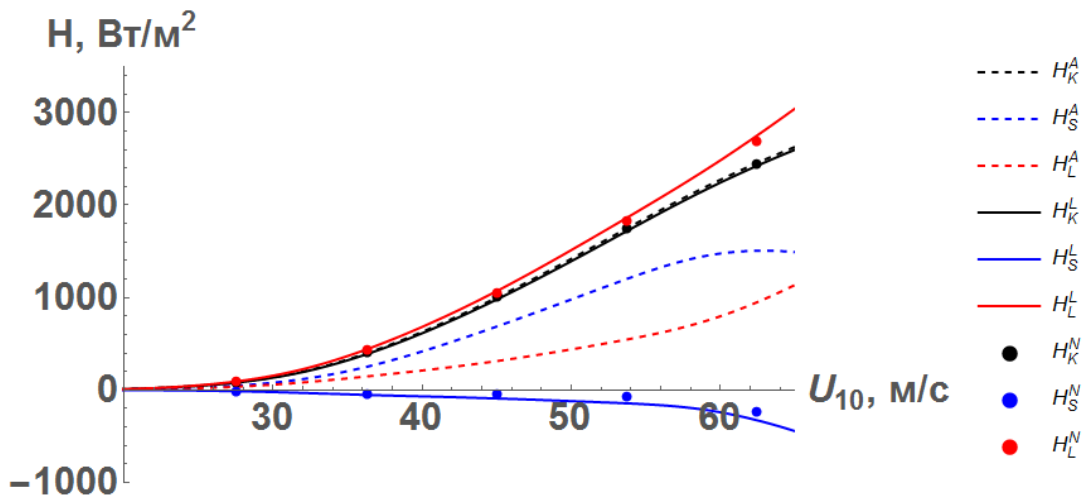


Рис. 6. Зависимость общих потоков тепла от капель, образованных при дроблении по типу «парашют», от скорости ветра U_{10} . Основные обозначения показаны на графиках. Верхние индексы «A», «L», «N» обозначают потоки, рассчитанные на основе параметризации Андреаса [31], предложенной параметризации (4) и численного решения уравнений микрофизики капли. Чёрным, синим и красным цветами показаны, соответственно, потоки энтальпии, явного и скрытого тепла. Параметры среды: $T_w = 27.5^\circ C$, $T_a = 25^\circ C$, $RH = 96\%$, $u_* = 3.5 м/с$.

Глава 4 посвящена изучению механизма образования начального возмущения поверхности воды, развитие которого может приводить к появлению «парашютов».

Предложена и исследована гипотеза о том, что формирование возвышений поверхности воды, из которых в дальнейшем образуются «парашюты», связано с неустойчивостью ветрового дрейфового течения. В рамках настоящей модели считалось, что эта неустойчивость обусловлена нелинейным резонансным взаимодействием триплета волн, одна из которых распространяется вдоль потока, а две другие – под одинаковым углом по обе стороны от основного течения (см. Рис. 7(a)).

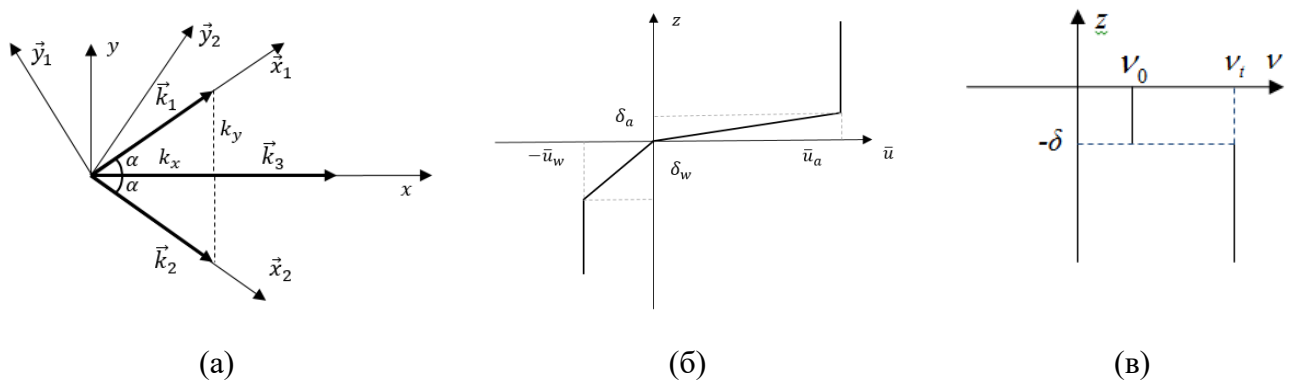


Рис. 7. (а) - схема расположения волновых векторов в триплете волн, (б) - профиль основного течения, (в) – профиль эффективной вязкости.

В разделе 4.2 для полного профиля скорости (Рис. 7(б)) получено дисперсионное соотношение для волн, распространяющихся под произвольным углом к потоку, в следующем виде

$$D_w(\omega_j, k_j, \alpha_j) + \lambda D_a(\omega_j, k_j, \alpha_j) = 0, \quad (8)$$

где $D_w(\omega_j, k_j, \alpha_j) = \omega_j^2 \frac{\cos \alpha_j \cosh k_j - (\omega_j + k_j \cos \alpha_j) e^{k_j}}{\cos \alpha_j \sinh k_j - (\omega_j + k_j \cos \alpha_j) e^{k_j}} + \omega_j \cos \alpha_j - (G + \Sigma k_j^2) k_j$, а

$$D_a(\omega_j, k_j, \alpha_j) = \omega_j^2 \frac{\cos \alpha_j \cosh(k_j \sqrt{\lambda \mu}) + \sqrt{\lambda \mu} (\sqrt{\lambda} \omega_j - k_j \cos \alpha_j) e^{k_j \sqrt{\lambda \mu}}}{\cos \alpha_j \sinh(k_j \sqrt{\lambda \mu}) + \sqrt{\lambda \mu} (\sqrt{\lambda} \omega_j - k_j \cos \alpha_j) e^{k_j \sqrt{\lambda \mu}}} - \frac{1}{\lambda \mu} \omega_j \cos \alpha_j + G k_j.$$

В [разделе 4.3](#) показана возможность выполнения трёхволнового синхронизма для волн на скачке завихренности в воде и установлено, что ветровой поток не оказывает существенного влияния на выбранную моду, поэтому в дальнейших рассуждениях рассматривалось лишь дрейфовое течение, которое считалось двухслойным. Упрощенная постановка задачи позволила рассмотреть более универсальную модель, учитывающую влияние вязкости. При этом считалось, что профиль эффективной вязкости является кусочно-постоянной функцией (Рис. 7(в)). Пример выполнения условий трёхволнового синхронизма для волн на скачке завихренности в профиле дрейфового течения показан на Рис. 8.

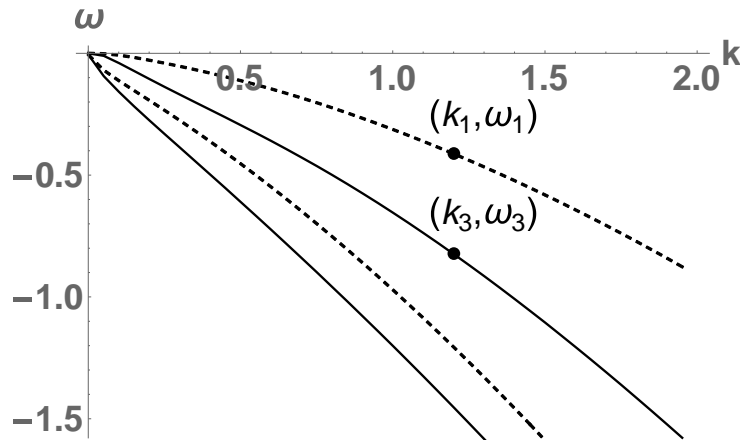


Рис. 8. Дисперсионные кривые для чисто дрейфового течения с учётом вязкости: сплошные кривые соответствуют продольной волне, пунктирные кривые – косо́й волне. Резонансные частоты и волновые числа: $k = k_3 = 1.2$, $\omega = -0.41 - 0.06i$, $\omega_3 = -0.82 - 0.07i$. Внешние параметры: $u_* = 1.1 \text{ м/с}$, $\delta_w = 0.8 \text{ мм}$, $\nu_w = 0.01 \text{ см}^2/\text{с}$, $\nu_t = 12\nu_w$, $\alpha = 60^\circ$.

[Раздел 4.4](#) посвящен выводу трёхволновых уравнений с учётом взаимодействия внутри критического слоя, нелинейности уравнений движения и граничных условий. В [разделе 4.5](#) показано, что решение полученной системы уравнений может расти взрывным образом (см. Рис. 9).

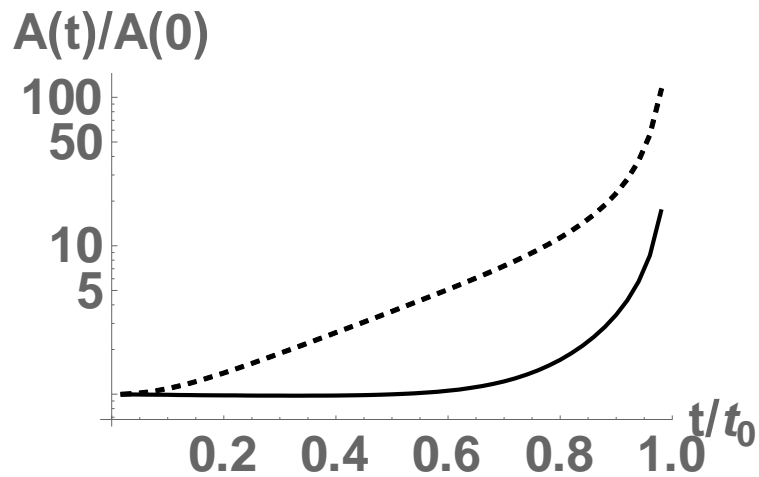


Рис. 9. Характерная зависимость амплитуд возмущения от времени. Сплошная линия соответствует амплитуде продольной волны, пунктирная линия – амплитуде косой волны. t_0 – время развития неустойчивости. Параметры те же, что указаны на Рис. 8.

Анализ дисперсионного соотношения показал, что для любого значения скорости существует некоторый диапазон углов распространения, при которых условия трехволнового синхронизма могут быть выполнены. Как следствие, спектр неустойчивых возмущений является широкополосным. По характеристикам этого спектра была получена зависимость от динамической скорости ветра поперечного размера смещения поверхности воды, соответствующего этим возмущениям, которая согласуется с экспериментальными данными о размерах «парашютов» (см. Рис. 10).

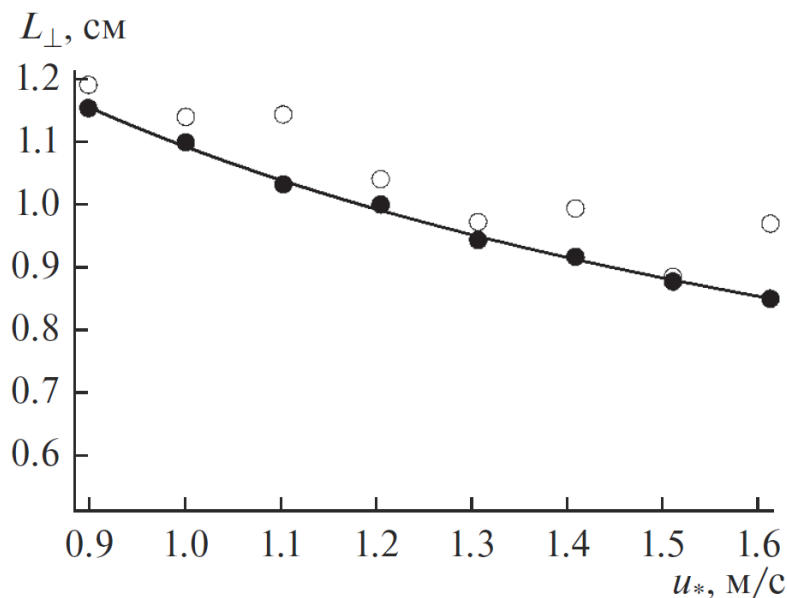


Рис. 10. Поперечный масштаб «парашютов»: чёрные кружки – оценка, полученная в рамках настоящей диссертации, линия – её аппроксимация, пустые кружки – экспериментальные данные о среднем начальном радиусе «парашютов».

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. На основе данных лабораторных экспериментов были классифицированы события, приводящие к образованию брызг. Показано, что доминирующим источником брызг, срываемых с гребней волн, при ураганных скоростях ветра является дробление «парашютов», которые представляют собой водную плёнку, окружённую более толстым ободком. На основе из общих принципов статистической физики получена зависимость числа событий фрагментации по типу «парашют» от скорости ветра.

2. Построена функция генерации брызг, обусловленных дроблением по типу «парашют». Использована модель, учитывающая, что генерация брызг при одном событии фрагментации обусловлена двумя механизмами: разрывом плёнки купола «парашюта» и дроблением его ободка. Для количественных оценок статистики капель от одного «парашюта» использовалась аналогия между процессами разрыва купола «парашюта» и подводного пузыря, а также сходство между фрагментацией его ободка и дроблением жидкой «нити». Построенная функция генерации хорошо согласуется с имеющимися результатами лабораторных экспериментов и натурных наблюдений о статистике капель при ураганных ветрах.

3. Получены количественные оценки влияния явления дробления по типу «парашют» на обмен импульсом между атмосферой и океаном, который определяется вкладом двух факторов: сопротивления, оказываемого куполами «парашютов» как препятствиями, и ускорения воздушным потоком капель в процессе их генерации. Их комбинация, а также учёт стратификации приподнятого слоя атмосферы за счёт присутствия взвешенных капель приводят к немонотонной зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от скорости ветра.

4. Получены оценки потока энтальпии, связанного с брызгами, для характерных условий тропического циклона. Было показано, что при скоростях ветра более 45-50 м/с поток энтальпии от капель может превышать турбулентный поток от поверхности океана.

5. Предложена и исследована гипотеза о том, что формирование начальных возвышений водной поверхности, развитие которых может приводить к дроблению по типу «парашют», обусловлено гидродинамической неустойчивостью возмущений ветрового дрейфового течения. Показано, что нелинейное резонансное взаимодействие триплета возмущений дрейфового течения может приводить к взрывному росту амплитуд волн. Получена зависимость поперечного размера смещения поверхности воды, соответствующего этим возмущениям, от динамической скорости ветра, которая согласуется с экспериментальными данными о размерах «парашютов».

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Large W.G. и S. Pond. Open Ocean Momentum Flux Measurements in Moderate to Strong Winds // *J. Phys. Oceanogr.* - 1981 г. - Т. 11. - С. 324–336.
- [2] Large W.G. и S. Pond. Sensible and Latent Heat Flux Measurements over the Ocean // *J. Phys. Oceanogr.* - 1982 г. - Т. 12. - С. 464–482.
- [3] М. М. Bell, М. Т. Montgomery, и К. А. Emanuel. Air-sea enthalpy and momentum exchange at major hurricane wind speeds observed during CBLAST // *J. Atmos. Sci.* - 2012 г. - Т. 69. - №11. - С. 3197–3222.
- [4] М. D. Powell, P. J. Vickery, и Т. А. Reinhold. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones // *Nature* - 2003 г. - Т. 422. - №6929. - С. 279–283.
- [5] Y. I. Troitskaya, D. A. Sergeev, A. A. Kandaurov, G. A. Baidakov, M. A. Vdovin, и V. I. Kazakov. Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions // *J. Geophys. Res. Ocean.* - 2012 г. - Т. 117. - №6. - С. 1–13.
- [6] М. А. Donelan *и др.* On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds // *Geophys. Res. Lett.* - 2004 г. - Т. 31. - №18. - С. L18306, 1–5.
- [7] E. Jarosz, D. A. Mitchell, D. W. Wang, и W. J. Teague. Bottom-up Determination of Air-Sea Momentum Exchange under a Major Tropical Cyclone // *Science (80-.)*. - 2007 г. - Т. 315. - С. 1707–1709.
- [8] К. А. Emanuel. Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange coefficients and a revised steady-state model incorporating eye dynamics // *J. Atmos. Sci.* - 1995 г. - Т. 52. - С. 3969–3976.
- [9] E. L. Andreas, J. B. Edson, E. C. Monahan, M. P. Rouault, и S. D. Smith. The spray contribution to net evaporation from the sea: A review of recent progress // *Boundary-Layer Meteorol.* - 1995 г. - Т. 72. - №1–2. - С. 3–52.
- [10] E. L. Andreas. A review of the sea spray generation function for the open ocean // *Atmos. Interact.* - 2002 г. - Т. 1. - С. 1–46.
- [11] F. Veron. Ocean Spray // *Annu. Rev. Fluid Mech.* - 2015 г. - Т. 47. - №1. - С. 507–538.
- [12] R. S. Bortkovskii. On the mechanism of interaction between the ocean and the atmosphere during a storm // *Fluid Mech. Sov. Res* - 1973 г. - Т. 2. - С. 87–94.
- [13] E. L. Andreas. Thermal and size evolution of sea spray droplets, Hanover.
- [14] S. C. Ling и T. W. Kao. Parameterization of the moisture and heat transfer process over the ocean under whitecap sea states // *J. Phys. Oceanogr.* - 1976 г. - Т. 6. - С. 306–315.
- [15] С. С. Кутателадзе и М. А. Стырикович. *Гидродинамика газожидкостных систем*. Москва: Энергия, 1976.
- [16] B. J. Azzopardi. Disturbance wave frequencies, velocities and spacing in vertical annular two-phase flow // *Nucl. Eng. Des.* - 1986 г. - Т. 92. - №2. - С. 121–133.

- [17] D. E. Spiel. The number and size of jet drops produced by air bubbles bursting on a fresh water surface // *J. Geophys. Res.* - 1994 г. - Т. 99. - №С5. - С. 10289–10296.
- [18] D. E. Spiel. The sizes of the jet drops produced by air bubbles bursting on sea-and fresh-water surfaces // *Tellus, Ser. B* - 1994 г. - Т. 46B. - №4. - С. 325–338.
- [19] D. E. Spiel. On the births of jet drops from bubbles bursting on water surfaces // *J. Geophys. Res.*, - 1995 г. - Т. 100. - С. 4995–5006.
- [20] D. E. Spiel. More on the births of jet drops from bubbles bursting on seawater surfaces // *J. Geophys. Res.* - 1997 г. - Т. 102. - С. 5815–5821.
- [21] D. E. Spiel. On the births of film drops from bubbles bursting on seawater surfaces // *J. Geophys. Res. Ocean.* - 1998 г. - Т. 103. - №С11. - С. 24907–24918.
- [22] P. H. Marmottant и E. Villermaux. On spray formation // *J. Fluid Mech.* - 2004 г. - Т. 498. - №498. - С. 73–111.
- [23] H. Lhuissier и E. Villermaux. Bursting bubble aerosols // *J. Fluid Mech.* - 2012 г. - Т. 696. - №November 2011. - С. 5–44.
- [24] D. C. Blanchard. *The electrification of the atmosphere by particles from bubbles in the sea*, - Т. 1. - №С. Pergamon, 1963.
- [25] D. C. Blanchard и L. D. Syzdek. Film drop production as a function of bubble Size // *J. Geophys. Res.* - 1988 г. - Т. 93. - С. 3649–3654.
- [26] M. Koga. Direct production of droplets from breaking wind-waves –its observation by a multi-colored overlapping exposure photographing technique // *Tellus* - 1981 г. - Т. 33. - №6. - С. 552–563.
- [27] F. Veron, C. Hopkins, E. L. Harrison, и J. A. Mueller. Sea spray spume droplet production in high wind speeds // *Geophys. Res. Lett.* - 2012 г. - Т. 39. - №16. - С. 1–5.
- [28] Y. Troitskaya, A. Kandaurov, O. Ermakova, D. Kozlov, D. Sergeev, и S. Zilitinkevich. Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds // *Sci. Rep.* - 2017 г. - Т. 7. - №1. - С. 1–4.
- [29] V. N. Kudryavtsev. On the effect of sea drops on the atmospheric boundary layer // *J. Geophys. Res. Ocean.* - 2006 г. - Т. 111. - №7. - С. 1–18.
- [30] R. J. Foreman и S. Emeis. Revisiting the definition of the drag coefficient in the marine atmospheric boundary layer // *J. Phys. Oceanogr.* - 2010 г. - Т. 40. - №10. - С. 2325–2332.
- [31] E. L. Andreas. Sea spray and the turbulent air-sea heat fluxes // *J. Geophys. Res.* - 1992 г. - Т. 97. - №С7. - С. 11429–11441.

СПИСОК СТАТЕЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Troitskaya. Y., Kandaurov. A., Ermakova. O., Kozlov. D., Sergeev. D., и Zilitinkevich. S. Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds // Sci. Rep. – 2017. – Т. 7. – № 1. – С. 1–4.
2. Troitskaya. Y., Kandaurov. A., Ermakova. O., Kozlov. D., Sergeev. D. и Zilitinkevich. S. The «bag breakup» spume droplet generation mechanism at high winds. Part I: Spray generation function // J. Phys. Oceanogr. – 2018. – Т. 48. – № 9. – С. 2168–2188.
3. Troitskaya. Y., Druzhinin. O., Kozlov. D. и Zilitinkevich. S. The «bag breakup» spume droplet generation mechanism at high winds. Part II: Contribution to momentum and enthalpy transfer // J. Phys. Oceanogr. – 2018. – Т. 48. - № 9. – С. 2189–2207.
4. Троицкая. Ю. И., Ермакова. О. С., Кандауров. А. А., Козлов. Д. С., Сергеев. Д. А., и Зилитинкевич. С. С. Дробление типа «парашют» - механизм генерации морских брызг при сильных и ураганных ветрах // Доклады Академии Наук. – 2017. – Т. 2. – С. 226–232.
5. Троицкая. Ю. И., Ермакова. О. С., Кандауров. А. А., Козлов. Д. С., Сергеев. Д. А., и Зилитинкевич. С. С. Немонотонная зависимость коэффициента сопротивления поверхности океана от скорости ураганного ветра - эффект генерации брызг за счёт дробления типа “парашют” // Доклады Академии Наук. – 2017. – Т. 3. – С. 357–362.
6. Троицкая. Ю. И., Дружинин. О. А., Ермакова. О. С., Кандауров. А. А., Козлов. Д. С., и Сергеев. Д. А. Исследование механизмов генерации морских брызг при сильных ветрах и их роли в механике и термодинамике ураганов // Океанологические исследования. – 2019. – Т. 7. – № 3. – С. 164–187.
7. Козлов. Д. С. и Троицкая. Ю. И. О роли взрывного взаимодействия трех поверхностных волн в начальной стадии образования брызг при сильных ветрах // Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана. – 2021. – Т. 57. – № 2. – С. 199–211.