

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Козлова Дмитрия Сергеевича

**«ДРОБЛЕНИЕ ПО ТИПУ «ПАРАШЮТ» КАК МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ БРЫЗГ ПРИ УРАГАННЫХ ВЕТРАХ И ЕГО РОЛЬ В ПРОЦЕССАХ ОБМЕНА МЕЖДУ ОКЕАНОМ И АТМОСФЕРОЙ»,**

представленной на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы.

### **Актуальность темы диссертации**

Диссертационная работа Д.С. Козлова посвящена изучению достаточно нового механизма генерации брызг – дробления по типу «парашют», а также оценке роли капель, образованных посредством этого механизма, во взаимодействии океана и атмосферы.

Изучение потоков импульса, скрытого и явного тепла на поверхности моря имеет важное прикладное значение для большого количества метеорологических и океанографических задач, поскольку указанные потоки в значительной степени контролируют энергию, гидрологический цикл и общую циркуляцию океана и атмосферы. В последнее время наибольший интерес вызывает изучение особенностей такого обмена при сильном и штормовом ветре, поскольку потоки тепла, импульса и влаги играют определяющую роль при формировании и развитии ураганов, и от корректности их параметризации зависит точность прогноза этих явлений. При построении различного рода прогностических моделей возникает необходимость учёта мелкомасштабных процессов. В частности, в этой работе автор исследовал роль брызг в процессе обмена между океаном и атмосферой.

Актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью развития параметризации потоков, поступающих от океана в атмосферу, при ураганных скоростях ветра.

### **Содержание диссертации**

Работа состоит из четырёх глав, введения и заключения. Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются её цели, кратко излагается содержание диссертации.

В **Главе 1** приведён обзор исследований, посвященных изучению процессов взаимодействия океана и атмосферы, а также эффектов связанных с каплями. Введены основные понятия, описывающие процессы обмена, представлены результаты как лабораторных, так и натуральных исследований коэффициентов переноса, в том числе для ураганных условий. Поскольку одна из задач, которые ставил перед собой диссертант, состоит в оценке оценки потоков тепла, связанных с брызгами, автор достаточно подробно описал термодинамику одиночной капли морской воды в атмосфере. В заключительном разделе этой главы автор сделал вывод о направлении необходимых исследований.

**Глава 2** посвящена изучению механизмов образования капель при экстремальных скоростях ветра в лабораторных условиях. Описана экспериментальная установка, а также методика сбора данных. Представлены результаты обработки видеозаписей, на основании которых был сделан вывод о доминирующей роли явления дробления по типу «парашют» в процессе генерации брызг при ураганных скоростях ветра. На основе экспериментальных данных о статистике событий дробления по типу «парашют» и аналогии этого явления с другими механизмами генерации брызг (разрыв пузыря и дробление жидких «пальцев») была найдена функция генерации брызг, которая характеризует статистику образованных капель. Представлено сравнение построенной функции генерации брызг с другими лабораторными и натурными данными о количестве инжектируемых капель.

В **Главе 3** на основе функции генерации брызг, построенной в **Главе 2**, были получены количественные значения потоков, связанных с каплями. При оценке потока импульса, обусловленного событиями дробления по типу «парашют», учитывались следующие эффекты: сопротивление, создаваемое куполами «парашютов»; импульс, который отнимают капли у воздушного потока в процессе их генерации; стратификация приводного слоя атмосферы, связанная с присутствием взвешенных в воздухе брызг. В этой главе также представлено уточнённое аппроксимационное решение уравнений микрофизики капли, которое позволило описать более резкое изменение радиуса капли в начальный момент времени. Усовершенствованная параметризация временной эволюции параметров капли, а также функция генерации брызг, найденная в **Главе 2**, позволили определить дополнительные потоки скрытого и явного тепла, энтальпии, связанных с брызгами. Важный с прикладной точки зрения результат, представленный в **Главе 3**, состоит в определении поправок, связанных с брызгами от «парашютов», к коэффициенту



аэродинамического сопротивления поверхности воды и коэффициенту переноса энтальпии.

В **Главе 4** проведено теоретическое исследование гидродинамической неустойчивости границы раздела воды и воздуха, следствием развития которой может стать явление дробления по типу «парашют». Основная идея, изложенная в этой главе, состоит в том, что смещение водной поверхности, которое подвержено дроблению, обусловлено резонансным взаимодействием триплета гармонических волн возмущения ветрового дрейфового течения. Для модельного профиля скорости и эффективной вязкости найдено дисперсионное соотношение и показана возможность выполнения трёхволнового синхронизма. Во втором порядке по теории возмущений получена система трёхволновых уравнений. Установлено, что нелинейное резонансное взаимодействие трёх волн возмущений течения, из которых одна волна направлена вдоль потока, а две другие – под углом к нему, приводит к взрывному росту амплитуд. Найдены характерные временные и пространственные масштабы неустойчивых возмущений, которые согласуются с экспериментальными данными о «парашютах».

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

Диссертация представляет собой цельное и обширное научное исследование, содержащее обобщающие **результаты, пригодные для практического использования** при построении параметризаций взаимодействия атмосферы и океана в численных моделях прогноза погоды и климата.

Ниже, в порядке изложения материала в диссертации, перечислены основные достоинства работы и приведены вопросы и небольшие замечания по каждой из глав (вопросы и замечания пронумерованы в общем порядке).

Следует отметить **высокое качество приведенного в первой главе обзора**. В этом обзоре подробно и доступно обобщены сведения, отражающие современный уровень понимания процессов генерации брызг на взволнованной поверхности и термодинамики отдельных капель, а также, указаны и объяснены причины по которым эти мелкомасштабные явления могут оказывать определяющее влияние на крупномасштабную динамику ураганов. Таким образом, автор **аргументированно обосновал направление исследований**.

Подробное описание лабораторных экспериментов, приведенное **во второй главе**, снабжено **наглядными иллюстрациями** различных возмущений поверхности,

приводящих к генерации капель. На основе статистики событий автор показал важность дробления по типу "парашют", чем **конкретизировал цели и задачи работы**. В той же главе приведена изящная параметризация среднестатистического количества событий дробления "парашютов" на основе закона Гиббса и установлена связь между статистикой этих событий в лабораторных условиях и их статистикой в условиях реального волнения, характеризуемого возрастом, выраженным через частоту спектрального пика.

1. Желательно пояснить фразу: "Заметим, что слабость "теплового контакта" обеспечивается сравнительно небольшим аэродинамическим сопротивлением поверхности океана, характерным даже для условий ураганов" (стр. 55). Имеется ли ввиду, что энергия "парашютов" мала по сравнению с энергией ветра и волн? При чем здесь аэродинамическое сопротивление всей поверхности?

2. В данной главе было бы полезно пояснить, почему при дальнейшем установлении статистических распределений характеристик "парашютов" и капель возраст волнения, отвечающий за отличия лабораторных условий от условий реальной среды, не учитывается.

В разделе 3.2 третьей главы приводятся оценки воздействия "парашютов" и капель на коэффициент обмена импульсом с поверхностью. **Рассмотрены все три основных механизма** механического взаимодействия воздуха с каплями и парашютами. **Справедливость подходов** к оценке дополнительных сил, связанных с каплями и парашютами, **не вызывает сомнения**. Учет стратификации выполнен традиционными способами.

К данному разделу имеются следующие вопросы:

3. В обзорной главе 1 приводятся формула Чарнока (1.27) и аппроксимации (1.28), (1.29), которые, как утверждается в работе, тоже справедливы и проверялись в примерно том же диапазоне скоростей ветра. Здесь автор перешел к эмпирической зависимости (3.9) для касательного напряжения трения  $F_{MW}$ , связанного с волнами. В чем преимущество этой зависимости? Существуют ли принципиальные отличия в поведении коэффициента  $C_D$  при сильном ветре при применении других известных аппроксимаций потока импульса и насколько они велики по сравнению со вкладом рассмотренных процессов?

4. Насколько справедливо суммирование сил  $F = F_{MW} + F_{Md} + F_{Mb}$  (3.8) и вычисление по этой суммарной силе коэффициента  $C_D$ ? Здесь не учитывается взаимное



влияние разных процессов, связанное с воздействием на турбулентность каждого из них. Необходимо пояснить какие допущения введены при таком суммировании?

5. При оценке влияния стратификации, созданной каплями, применяется теория подобия Мони́на-Обухова. При этом, сам слой, в котором концентрация капель велика, по своей толщине может быть сравним с высотой волн. Сопротивление формы создается при турбулентном обтекании волн и динамическая скорость  $u^*$  преимущественно определяется этим сопротивлением. Таким образом, в данном случае, толщина слоя шероховатостей, может быть сравнима, или даже превышать толщину слоя в котором эффекты стратификации наиболее существенны. Применение теории подобия внутри слоя шероховатостей спорно. Необходимо обосновать введенные допущения.

В разделе 3.3 подробно исследован обмен явным и скрытым теплом между каплями и атмосферой. Раздел содержит **важный с практической точки зрения промежуточный результат** - упрощенную линеаризованную модель эволюции капли (3.22), которая, помимо данной работы, может быть использована, например, при численных расчетах турбулентности и капель в облаках с применением переноса лагранжевых частиц.

В главе 3 приводятся финальные оценки отношения коэффициентов обмена энтальпией и импульсом. Эти оценки получены с использованием всех основных результатов предыдущих разделов диссертации и объясняют возможность возникновения ураганов. Таким образом, главы 1-3 представляют собой **комплексное исследование**, выполненное с привлечением экспериментальных, статистических и теоретических подходов и **доведенное до единой модели сложного физического процесса**.

Четвертая глава, в которой предлагается определять характерные временные и пространственные масштабы "парашютов", связав их с масштабами первоначальных возмущений, найденных как результат нелинейного трехволнового взаимодействия, удачно дополняет материал диссертации и **демонстрирует высокую квалификацию автора в области физики и математики**.

В качестве замечаний к этой главе следует отметить:

6. Предельное упрощение модели ламинарного и турбулентного слоев, которое вполне применимо для получения качественно верных результатов, однако может существенно повлиять на количественные оценки искомых масштабов.

7. Как понятно из текста, в полученной модели в качестве динамической скорости  $u^*$  для дрейфового течения используется полная динамическая скорость, связанная, в том

числе, и с сопротивлением формы волн, и самими "парашютами", тогда как, характеристики вязкого и буферного слоев должны определяться касательным напряжением трения на самой взволнованной поверхности, которое значительно меньше, чем суммарный поток импульса. Желательно дать пояснения - насколько такое упрощение влияет на результаты качественно и количественно.

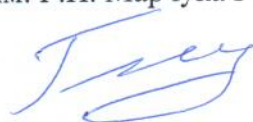
Приведенные замечания не умаляют качества представленного материала. Работа выполнена на высоком профессиональном уровне. Диссертация изложена хорошим литературным языком. При описании рассматриваемых явлений просто и доступно поясняются их основные физические свойства. Диссертация содержит обширный список научной литературы по теме работы.

**Автореферат** работы Козлова Д.С. соответствует содержанию диссертации, достаточно полно отражает её структуру и даёт возможность сделать заключение о её высоком научном уровне. Основные положения диссертации нашли отражение в 23 работах, 7 из которых опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, посвященных физике атмосферы и океана. Работа прошла апробацию на многочисленных российских и международных конференциях.

Из вышеизложенного следует, что представленная к защите диссертационная работа Козлова Д.С. полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к соискателям на присвоение степени кандидата наук, а сам Козлов Д.С. заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Я, Глазунов Андрей Васильевич, даю своё согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

Ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук"

 д.ф.-м.н. А.В. Глазунов

199991, Москва, ул. Губкина, д. 8, ИВМ РАН  
тел. +7-495-984-81-20 (39-22)  
e-mail: glazunov@inm.ras.ru

«Подпись руки А.В. Глазунова заверяю»  
Ученый секретарь ИВМ РАН





д.ф.-м.н. Шутяев В.П.

« 11 » ноября 2021