

## 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»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Диссертационная работа Козлова Дмитрия Сергеевича посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям механизмов генерации морских брызг при сильных ветрах и их влияния на процессы обмена импульсом, теплом и влагой между океаном и атмосферой. Особое внимание уделяется изучению генерации брызг при разрыве и дроблении особенностей поверхности, имеющих форму «парашюта», которые представляют основной источник брызг при ветрах ураганной силы.

Достоверное описание потоков импульса, тепла и влаги на границе раздела океан-атмосфера критически важно для моделирования динамики океана и атмосферы на различных пространственно-временных масштабах, включая климатические. Немногочисленные экспериментальные исследования выявили особое поведение коэффициентов сопротивления и тепло/влаго-обмена между океаном и атмосферой при сильных ветрах, которое существенно отличается от умеренных ветров, и исключает экстраполяцию их зависимостей на условия сильных ветров. Параметризации коэффициентов обмена, используемые в численных моделях, носят в основном ad hoc характер. В настоящее время общепринято, что пена и брызги генерируемые при обрушениях волн ответственны за особенности массо- и тепло обмена при штормовых и ураганных ветрах. Однако, физические процессы, происходящие на границе раздела океан-атмосфера при этих условиях далеки от полного понимания, не говоря уже об их количественном описании. Сказанное выше определяет актуальность и важность данной диссертации, где приводятся результаты исследования механизмов генерации брызг, их распределения по размерам и влияния на потоки импульса и энтальпии в приводном слое атмосферы на основе лабораторных экспериментов в ветро-волновом канале с использованием уникальной аппаратуры и методов обработки данных измерений.

Диссертация состоит из Введения, четырех Глав и Заключения. Во Введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, приведены положения, выносимые на защиту, научная и практическая значимость результатов.

**В Главе 1** представлен обзор исследований по взаимодействию океана и атмосферы при сильных ветрах с акцентом на процессы, связанные с механизмами генерации брызг и их распределения по размерам, термодинамики отдельных капель. Приведены результаты лабораторных и натурных исследований коэффициентов переноса импульса, тепла и влаги для широкого диапазона скоростей ветра, включая экстремальные, сформулированы нерешенные проблемы и задачи, которые далее исследуются в диссертации.

**Глава 2** посвящена исследованию генерации брызг при ураганных ветрах на основе измерений в ветро-волновом канале. По данным видеосъемки дана классификация основных явлений, приводящих к генерации капель: дробление жидких «нитей», разрыв крупных подводных пузырей и дробление по типу «парашют». Показано, что дробление по типу «парашют» является доминирующим источником крупных брызг при ураганных скоростях ветра. На основе общих принципов статистической физики получена зависимость числа событий фрагментации по типу «парашют» от динамической скорости ветра. Получены распределение начального и конечного радиуса «парашютов», скоростей их движения, а также времени жизни.

Основным результатом этой главы явилось построение функции генерации брызг за счет дробления особенностей поверхности, имеющих форму «парашют». Построенная функция генерации в диапазоне радиусов 30мкм - 300мкм согласуется с имеющимися наблюдениями. Однако, предложенная функция показывает существенно большее число крупных капель, которые генерируются при разрывах «парашютов». Этот результат важен, так как именно крупные капли влияют на потоки тепла импульса и влаги.

**В Главе 3** представлены оценки потоков, импульса и энтальпии на основе разработанной функции генерации брызг. Рассматривается 3 эффекта влияния капель на аэродинамическое сопротивление: сопротивление формы купола «парашюта»; силы направленные на ускорение образовавшихся при разрывах капель; влияние взвешенных капель на интенсивность турбулентного перемешивания за счет действия сил плавучести. Как показано, ни один из этих факторов не приводит к существенному влиянию брызг на коэффициент сопротивления поверхности моря.

Показано, что эффект брызг наиболее значимо влияет на потоки скрытого и явного тепла в приводном пограничном слое. Разработана усовершенствованная параметризация



эволюции радиуса и температуры капли во времени. С помощью этой параметризации получена оценка количества энтальпии, поступающее в атмосферу от одиночной капли за время её жизни, и далее – от ансамбля капель, заданных функцией генерации брызг. Показано, что при скоростях ветра более 45-50 м/с поток энтальпии от капель может превышать турбулентный поток энтальпии от поверхности океана. Это приводит к очень важному эффекту, - росту отношения коэффициента переноса энтальпии и к коэффициенту сопротивления, которое при скоростях ветра 35-40 м/с превышает пороговое значение 0.75, обеспечивающее развитие ураганов и достижение ими высокой интенсивности.

В Главе 4 рассматривается один из возможных механизмов образования начального возмущения поверхности воды, развитие которого может приводить к неустойчивости и разрывам поверхности по типу «парашют». Автор выдвигает гипотезу, о том, что формирование возвышений поверхности воды, инициирующих фрагментацию по типу «парашют», обусловлено неустойчивостью ветрового дрейфового течения вследствие нелинейного резонансного взаимодействия триплета волн. По мнению автора, предложенная модель не может рассматриваться как окончательная, так как не объясняет наблюдаемую пороговую зависимость явления от скорости ветра.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы и выводы. В тексте диссертации цитируется 112 работ, достаточно полно отражающих современное состояние по рассматриваемой проблеме.

#### **Замечания по диссертации:**

1. В работе неоднократно встречаются эмпирические выражения, в которых размерности левой и правой частей разные, например, (2.3), (2.13), (2.16)-(2.21). Понятно, что эти выражения получены эмпирически, тем не менее, масштабирование всегда желательно, так как за этим неизбежно кроется физика. Например, введение классических масштабов теории подобия развития волн (ускорение свободного падения, разгон волн и масштаб ветра) позволило бы распознать в (2.3) известный закон развития волн Тобы, который выполнялся в рассматриваемых экспериментальных условиях.
2. В разделе 3.2.3. исследуются полные сдвиговые напряжения в атмосферном погранслое при ураганных ветрах, состоящие из 3-х компонент: потоков импульса к волнам, сопротивления формы парашюта и сил требуемых для ускорения брызг после их образования. Две последние компоненты рассчитываются на основе

результатов работы, а для расчета первой компоненты автор привлекает некое выражение из работы [100], которое, более того, не пригодно для сильных ветров (область ее применения ограничена скоростями меньше 25м/с). Этот выбор представляется весьма спорным. Во-первых, если рассматривать эксперименты в ветро-волновом канале, в распоряжении автора были как измерения спектров волн и ветра, так и модельный инструмент для расчета потоков импульса к волнам. В этом случае, можно было бы оценить роль каждой составляющей полного потока импульса, основываясь на данных измерений, что представляло бы безусловную научную ценность. В то время как показанные на рис 2.20 коэффициенты сопротивления, учитывающие вклад волн в виде [100], представляют условный научный интерес.

3. В разделе 3.2.2. автор правильно отмечает, что приведенная оценка вклада ускорения брызг в сопротивление потока является верхней оценкой, так как она не учитывает возврат количества движения от капель к воздушному потоку при их падении вниз через вертикальный сдвиг скорости ветра. Этот эффект аналогичен ускорению ветра в приземном атмосферном слое при падении дождевых капель. Автор предположил, что этот эффект (в силу высокой инерции наиболее крупных брызг) не должен оказать существенного влияния на оценки коэффициентов сопротивления. Однако никаких количественных оценок, обосновывающих это предположение, не дано, хотя это можно было бы сделать по аналогии с тем, как это сделано в разделе 3.3 для потоков скрытого и явного тепла. Это можно квалифицировать не как недостаток, а как упущенную возможность усилить работу.

Высказанные замечания, следует рассматривать как пожелания, которые никак не подвергают сомнению общий высокий научный уровень работы, обоснованность выводов и положений, выносимых на защиту.

В целом, диссертационная работа является законченным научным исследованием, в котором детально исследованы новые механизмы генерации морских брызг, их статистические характеристики, и влияние брызг на потоки импульса и энтальпии в атмосферном погранслое над волнами при ураганных ветрах. Очень важно, что исследования основаны на фактическом материале, - результатах экспериментов в ветро-волновом канале ИПФ РАН с применением уникальной аппаратуры и методов обработки и анализа данных.

Результаты по теме диссертации опубликованы в 7 статьях в ведущих российских и зарубежных научных журналах, входящих в список Web of Science и ВАК, и широко представлены на российских и международных конференциях, Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа Козлова Дмитрия Сергеевича полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,  
заведующий Лаборатории Спутниковой Океанографии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

12 ноября 2021 г.

Кудрявцев Владимир Николаевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

192007, Российская Федерация,

Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79

Телефон (921) 912-47-11,

E-mail: kudr@rshu.ru

Подпись доктора физ.-мат. наук В.Н. Кудрявцева удостоверяю.

И.О. Проректор по научной работе

И. Г. Мясников

“12” ноября 2021

