

*Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 26 – 30 июня 2017 г.*

УДК 551.468

О.С. Ермакова, А.А. Кандауров, Д.А. Сергеев, Ю.И. Троицкая

*Институт прикладной физики РАН, Россия
603950, Нижний Новгород, Ульянова ул. 46, E-mail: daniil@hydro.appl.sci-nnov.ru*

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ БРЫЗГ ПРИ ВЕТРО ВОЛНОВОМ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ТЕНЕВЫМИ МЕТОДАМИ**

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты исследований механизмов генерации брызг, при обрушении волн, полученные в рамках лабораторного моделирования ветро-волнового взаимодействия на Высокоскоростном ветро-волновом канале ИПФ РАН. Для исследований использовалась система многоракурсной высокоскоростной видеосъемки с применением теневого метода, включая подводную подсветку. Полученные результаты позволили классифицировать механизмы, приводящие к образованию брызг.

**БРЫЗГИ, ВЕТЕР, ВОЛНЫ, ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТЕНЕВОЙ
МЕТОД ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ВИДЕОСЪЕМКА**

ВВЕДЕНИЕ

Брызги воды, образующие в приводном слое атмосферы над морской поверхностью представляют собой капли с размерами от десятков нанометров до нескольких миллиметров. Они инжектируются с морской поверхности в результате обрушений волн в прибрежной зоне или при сильных ветрах. Крупные капли с размерами от 10 мкм до нескольких миллиметров после отрыва с поверхности, затем оседают в океан под действием силы тяжести, обеспечивая, таким образом, прямой обмен массой, теплом и импульсом между атмосферой и океаном. В частности, в последнее время считается, что потоки явного и скрытого тепла, связанные с брызгами, играют определяющую роль в развитии штормов и тропических ураганов (см., например, [1]). Однако, в оценках этих эффектов остаются значительные неопределенности, связанные с тем, что потоки определяются плохо изученными величинами: количеством брызг различных размеров, вылетающих с поверхности, и их начальными скоростями. Так, эмпирическая функция генерации брызг, которая характеризует распределение брызг по размерам, вылетающих с единицы поверхности в единицу времени, в разных наблюдениях может отличаться на шесть порядков (см. сводку экспериментальных данных в [2]). Подобные неопределенности связаны как с трудностями проведения измерений в натуральных условиях в условиях шторма, так и с недостаточной изученностью механизмов генерации брызг.

Лабораторное моделирование на ветро-волновых каналах является хорошей альтернативой для натуральных исследований, т.к. позволяет обеспечить контролируемость условий и их воспроизводимость для получения необходимого ансамбля реализаций для последующей статистической обработки. Ранее были выполнены исследования по исследованию механизмов генерации капель в работах [4, 5, 6]. В них применялись теневые

методы наблюдений (включая использование высокоскоростной съемки в [6]). В настоящей работе был предложен новый подход, базирующийся на использовании теневого метода с высокоскоростной видеосъемкой с разных ракурсов, включая вид сверху с подсветкой из под воды. Использование видеосъемки, скорость которой почти в 10 раз превосходила используемую в наиболее современной работе [6], позволила пронаблюдать и в деталях исследовать ранее упоминавшиеся механизмы генерации.

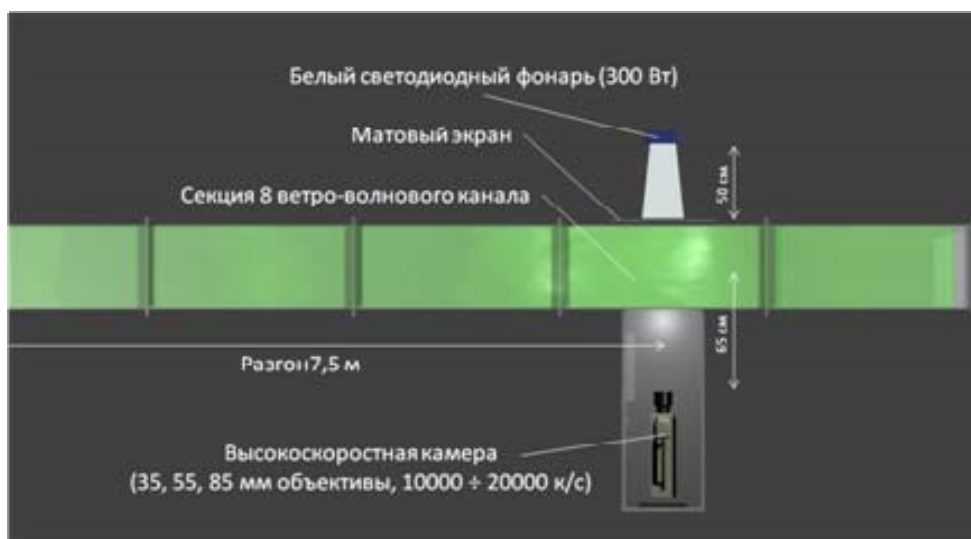
ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА, СХЕМЫ ПОДСВЕТКИ И ВИДЕОСЪЕМКИ

Эксперименты проводились на Высокоскоростном Ветро-волновом канале Большого термостратифицированного бассейна ИПФ РАН. Канал воздушного потока сечением $0,4 \times 0,4$ м имеет длину над водной поверхностью 10 м, максимальная скорость воздушного потока в канале, приведенная к высоте 10 м, составляет 40 м/с. Подробное описание этой установки, принципов создания и управления воздушным потоком в ней приведено в [3].

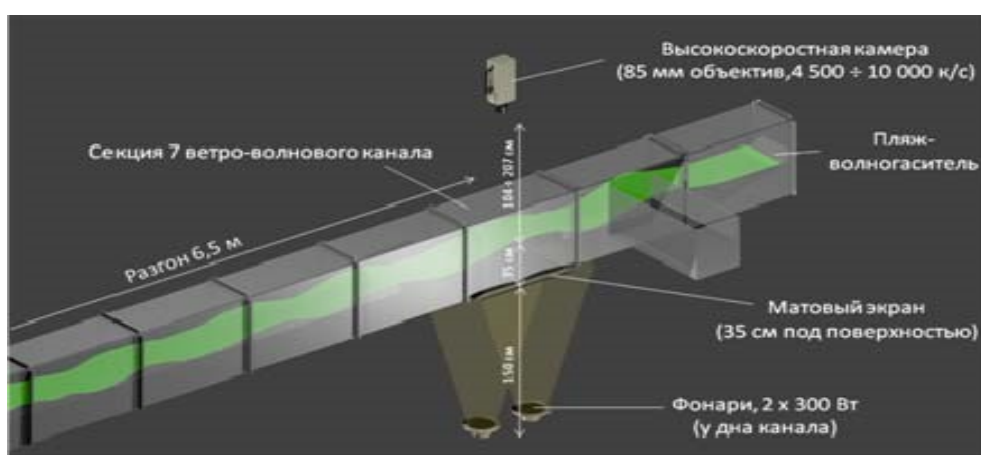
Съемка поверхности воды в канале производилась с помощью высокоскоростной цифровой камеры NAC Memrecam NX-3 с двух различных ракурсов: вид сверху в 7 секции канала с использованием подводной подсветки (вертикальный теневой метод) см. Рис. 1а, и вид сбоку в 8 секции канала с использованием вертикального матового экрана и надводного светодиодного фонаря мощностью 300 Вт (горизонтальный теневой метод) Рис. 1б.

В случае горизонтального теневого метода камера располагалась в герметичном боксе, прикрепленном к боковой стенке канала в районе 8 секции (длина разгона 7,5 м). (см. Рис. 1а). Оптическая ось объектива камеры расположена на 5 см выше уровня поверхности воды, направлена горизонтально. Расстояние от камеры до области съемки 65 см. Светодиодный прожектор установлен сбоку 8 секции канала на расстоянии 50 см от стенки и на высоте менее 5 см от поверхности воды. Непосредственно на боковой стенке канала противоположной камере размещен матовый экран. Для съемки использованы объективы с фокусными расстояниями 50 и 85 мм (последний с макрокольцом для возможности фокусировки на дистанции меньше 1 м), масштабы изображений от 55 до 119 мкм/пиксель, скорость съемки 10 000 к/с. Для скоростей ветра от 14 до 24 м/с получены детальные боковые записи особенностей поверхности длительностью менее секунды - при сохранении записей с камеры выбирались только части, содержащие моменты генерации брызг.

Для получения статистических данных о событиях на поверхности, приводящих к генерации брызг, проводилась съемка с использованием вертикального теневого метода (см. Рис. 1б). Съемка проводилась через прозрачную верхнюю стенку канала в 7 секции (длина разгона 6,5 м). Камера располагалась вертикально на удалении от 104 до 207 см от поверхности воды. При этом для уменьшения проявления на получаемых изображениях волн с малым уклоном достигалась максимально возможная однородность засветки за счет удаления подводных фонарей от экрана в системе подводной подсветки. Была исследована зависимость качества получаемого изображения от расположения элементов подсветки. Выявлено, что наилучшее качество изображения достигается при максимальном удалении подводных фонарей от матового экрана, что, однако, приводит к значительному снижению яркости получаемых изображений при использовании широкого поля съемки (более 10 см). При основной серии экспериментов использован объектив с фокусным расстоянием 85 мм и минимальным диафрагменным числом 1.4, при этом для увеличения глубины резкости в зависимости от амплитуды волн диафрагменное отверстие прикрывалось. Съемка проводилась при скоростях 4500 и 10 000 к/с с масштабами 256 и 124 мкм/пиксель соответственно в широком диапазоне скоростей ветра (14 - 24 м/с). Получены записи длительностью до 8 секунд.



(a)



(б)

Рис. 1. Схемы проведенных экспериментов при горизонтальном теновом методе (а) и вертикальном теновом методе (б).

АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ БРЫЗГ

Теневые фотографии типичных событий, приводящих к генерации капель, показаны на Рис. 2, и можно предложить их следующую классификацию.

1) Дробление жидких "пальцев" (Рис. 2а).

В работе [4] было обнаружено, что в районе гребней обрушающихся волн развиваются небольшие выступы воды, которые затем растягиваются в «пальцы» и разрываются на капли. В наших наблюдениях дробление каждого такого объекта приводит к генерации одной-двух капель диаметрами несколько миллиметров.

2) Разрыв подводных пузырей (Рис. 2б).

Подводные пузыри, формирующиеся у гребней обрушающихся волн, всплывают из-за положительной плавучести и разрываются при достижении поверхности воды, генерируя брызги. Детальная модель этого явления была разработана в [5]. До последнего времени это явление считалось основным механизмом генерации брызг [5]. Однако, наши видеозаписи неожиданно продемонстрировали его сравнительно низкую эффективность: только около 5% наблюдаемых больших подводных пузырей достигало поверхности и лопало с образованием брызг.

3) Дробление типа "парашют" (Рис. 2в).

Это явление начинается с появления мелкомасштабного возвышения водной поверхности, затем развивающегося в «микро-парус», который затем раздувается в

«парашют», представляющий собой мембрану из водной пленки, окруженную более толстым «ободком», и разрывается, образуя сотни брызг. В инженерной гидродинамике [7] этот механизм известен как режим дробления жидкости в газовом потоке типа "парашют". Ранее такой режим генерации брызг в лабораторном канале был описан в [6], однако его значимость в ураганных условиях не обсуждалась.

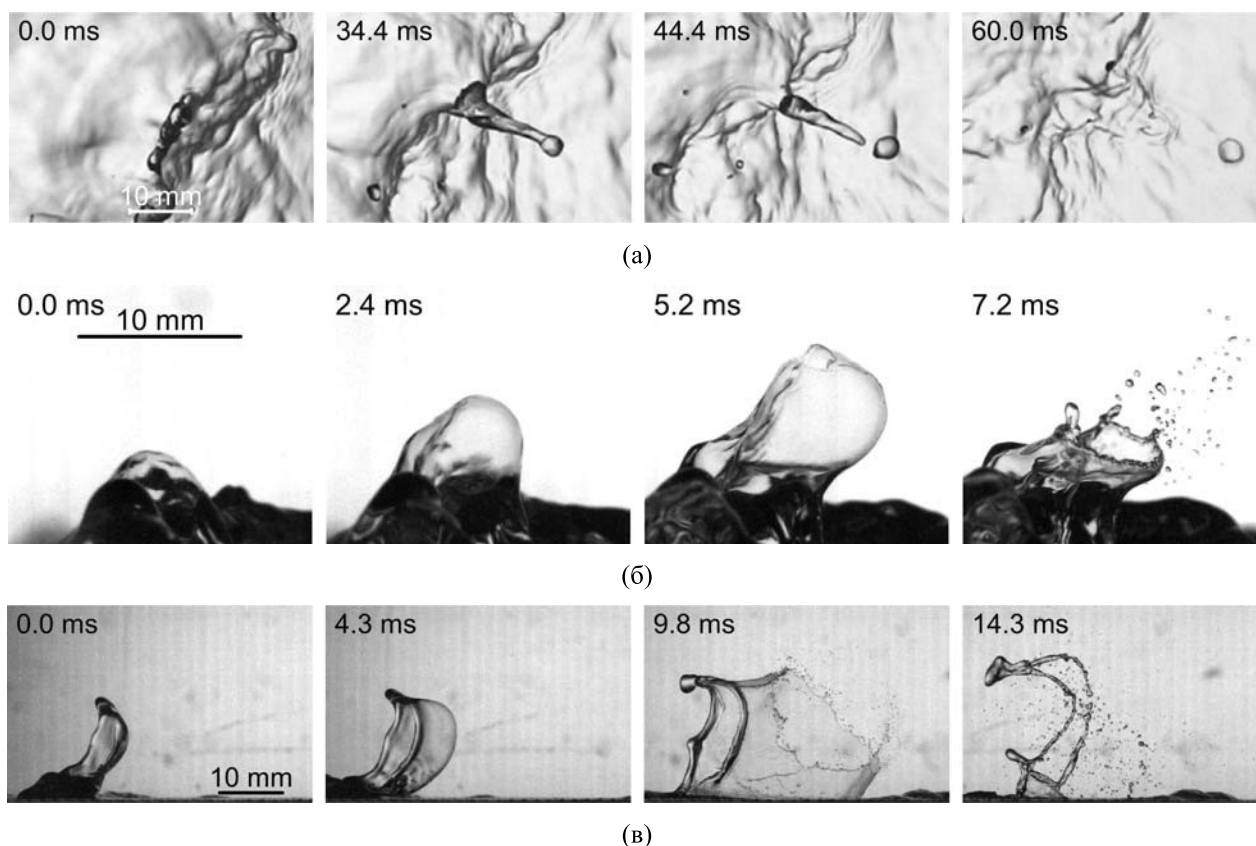


Рис. 2. Фотографии событий, сопровождающих генерацию брызг (а) дробление жидких "пальцев" (вид сверху); (б) разрыв подводных всплывающих пузырей; (в) формирование и разрыв «парашюта» (вид сбоку).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На Ветро-волновом канале Большого термостратифицированного бассейна ИПФ РАН выполнены эксперименты по изучению механизмов генерации брызг при ураганном ветре с помощью теневой подсветки и высокоскоростной видеосъемки с нескольких ракурсов. Построена классификация механизмов дробления приводящих к брызгам. Анализ последовательности кадров высокоскоростного видео показал, что основным механизмом генерации капель в приводном слое атмосферы при штормовом и ураганном ветре является дробление типа «парашют». Активация этого процесса происходит при скорости ветра приблизительно 20 м/с, что соответствует скорости ветра 8 баллов по шкале Бофорта. Более подробно результаты работы описаны в [8].

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№14-07-0667), расчет статистики капель выполнен О.С. Ермаковой при поддержке РФФИ (грант 16-05-00839), программное обеспечение разработано А.А. Кандауровым при поддержке гранта Президента МК-2041.2017.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Andreas E. L.**, A review of the sea spray generation function for the open ocean, in Atmosphere-Ocean Interactions, V. 1 edited by W. Perrie, WIT Press. Billerica. Mass.2002. P. 46.
2. **Andreas E. L.**, A review of the sea spray generation function for the open ocean, in Atmosphere-Ocean Interactions, V. 1 edited by W. Perrie, WIT Press. Billerica. Mass.2002. P. 46.
3. **Troitskaya Yu. I., Sergeev D.A., Kandaurov A.A., Baidakov G.A, Vdovin M.A., Kazakov V.I.** // Journal Geophys. Res. 2012. V. 117. P. NC00J21.
4. **Koga M.** // Tellus. 1981. V.33. P. 552–563
5. **Lhuissier H., Villermaux E.** // J. Fluid Mech. 2012. V. 696. P. 5–44.
6. **Veron F., Hopkins C., Harrison E.,Mueller J. A.** //Geophys. Res. Lett. 2012. V.39. P.L16602.
7. **Gelfand B.E.**// Prog. Energ. Combust. Sci. 1996. V. 22. P.201–265.
8. **Troitskaya Y, Kandaurov A, Ermakova O, Kozlov D, Sergeev D, Zilitinkevich S** // Nature Sci Rep. 2017 May 9;7(1):1614. doi: 10.1038/s41598-017-01673-9.

O.S. Ermakova, D. A. Sergeev, A.A. Kandaurov, D. Yu. I. Troitskaya

*Institute of applied physics RAS, Russia,
603950, Nizhny Novgorod, Uliyanova st, 46, E-mail: daniil@hydro.appl.sci-nnov.ru*

INVESTIGATION OF THE MECHANISMS OF SPRAY GENERATION INDUCED BY WIND-WAVE INTERACTION USING SHADOW TECHNIQUE

The paper presents the results of investigations of the mechanisms of spray of droplets generation by breaking waves obtained within laboratory modeling of wind-wave interaction on the High-speed wind-wave channel of the IAP RAS. For the research, a multi-angle high-speed video system was used together shadow method, including underwater illumination. The results allowed us to classify the mechanisms leading to the formation of droplets.

SPRAY, WIND, WAVES, LABORATORY MODELING, SHADOW METHOD, HIGH SPEED FILMING