

# Исследование оптическими методами явлений генерации брызг по типу "парашют" в природных и технических системах

Д.А. Сергеев<sup>1</sup>, Ю.И. Троицкая<sup>2</sup>, А.В. Черданцев<sup>3</sup>

ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-4910-3935, [daniil@ipfran.ru](mailto:daniil@ipfran.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-3818-9211, [yuliyatrinity@mail.ru](mailto:yuliyatrinity@mail.ru)

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0003-4011-753X, [cherdantsev@itp.nsc.ru](mailto:cherdantsev@itp.nsc.ru)

## Аннотация

В настоящей работе обсуждаются результаты детального исследования процесса дробления по типу «парашют» (или bag breakup), полученные с помощью различных панорамных оптических методов: теневого метода визуализации и лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) с использованием высокоскоростной видеосъемки. Эксперименты проводились в двух принципиально разных конфигурациях. При обдуве глубокого слоя воды, с присутствием крупномасштабных волн на поверхности, и напротив в условиях тонких слоев жидкости. Сопоставление результатов наблюдений продемонстрировало, не только общее сходство сценария эволюции, но также зависимостей пространственно-временных масштабов процесса дробления и образования капель по типу «парашют» от характерных скоростей потоков. Это свидетельствует об универсальном характере явлений, приводящих к фрагментации и срыву капель с поверхности жидкости, обдуваемой газовым потоком в природных и технических гидродинамических системах широкого класса с масштабами, варьирующимися в широком диапазоне.

**Ключевые слова:** капли, фрагментация, лабораторное моделирование, теневой метод, ЛИФ, высокоскоростная видеосъемка.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Механизм дробления элементов жидкости (отдельных капель или струй) по типу bag breakup (когда происходит формирование куполов тонкой пленки с утолщенным ободком с последующим разрывом и формированием капель), в спутных газовых потоках был описан достаточно давно (см., например, например обзор [1]). Было показано, что он наблюдается в диапазоне числа изменения числа Вебера ( $We = \rho V^2 D / \sigma$ ,  $\rho$  - плотность жидкости,  $V$  - скорость газового потока относительно капли,  $D$  - диаметр капли,  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения) от 12 до 50. Данные режимы например для воды комнатной температуры могут быть реализованы для капель от 100 мкм до 10 мм, при скоростях воздуха от 10 см/с до 100 м/с. Т.е. речь идет о достаточно распространенных условиях многофазных потоков, как в технических так и природных системах. Однако, как показали более поздние работы [2-5], этот процесс типичен при фрагментации свободной поверхности слоя жидкости при ее обдуве потоком газа в разнообразных технических и природных системах. Наиболее типичные представители первых это тонкослойные течения жидкости, обдуваемые газовыми потоками, которые реализуются, например, в трубах энергетических установок в условиях межфазных переходов (конденсация паров). Ярким примером природных систем, где наблюдаются эти явления (впервые в [6]) является взаимодействие воздушных потоков турбулентного пограничного слоя атмосферы с поверхностью

объектов гидросферы, и в первую очередь мировым океаном. Как было продемонстрировано в работе [7], механизм bag breakup является доминирующим и, соответственно на его основе была построена функция генерации брызг морского аэрозоля (см [8]). Также был предложен русскоязычный аналог термина этого явления – дробление по типу «парашют» (далее в тексте мы опускаем кавычки). Таким образом, мы имеем дело с системами принципиально разных характерных пространственных масштабов. Однако для разработки общей теории, позволяющей не только качественно, но количественно описывать эти явления в разных системах, необходимо было получить и сопоставить их пространственно-временные характеристики. В настоящей работе вначале были проведены оценки параметров парашютов, образующихся в экспериментах по моделированию ветроволнового взаимодействия в лабораторных условиях. Затем анализировались результаты исследований течений тонких пленок, обдуваемых газом в трубах. В обоих экспериментах были использованы панорамные оптические методы наблюдений.

## 1. Эксперимент по исследованию процессов фрагментации типа парашют на поверхности глубокого слоя жидкости

На Высокоскоростном Ветроволновом Канале (ВВК) ИПФ РАН была проведена серия экспериментов, направленная на детальное изучение явлений фрагментации поверхности глубокого слоя жидкости, обдуваемого потоком воздуха в условиях лабораторного моделирования процессов генерации морского аэрозоля при ветроволновом взаимодействии. Схема проведения экспериментов (см. рис. 1) и измерений была аналогична ранее использованной в работе [7].

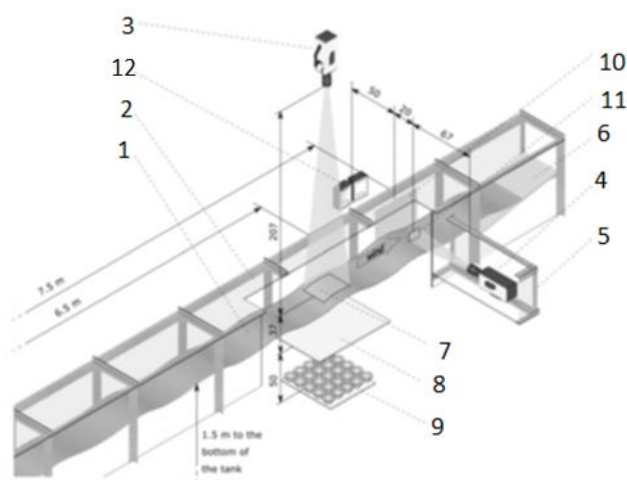


Рис. 1. Общая схема экспериментальной установки по исследованию процессов генерации брызг при взаимодействии воздушных потоков с глубоким слоем воды в присутствии крупномасштабных волн: 1) взволнованная поверхность 2) корпус ВВК 3) камера в позиции съёмки сверху 4) камера в позиции съёмки сбоку 5) полупогруженный герметичный бокс 6) волногаситель 7) область съёмки вида сверху 8) подводный матовый экран 9) подводный светильник 10) боковой матовый экран 11) область съёмки вида сбоку 12) боковой светильник

Диапазон изменения скорости на оси аэродинамического канала сечением 0,4×0,4 м, установленного над свободной водной поверхностью глубиной 1,5 м, составил от 16 до 25 м/с. При этом эквивалентная скорость ветра  $U_{10}$ , пересчитываемая на высоту стандартных метеорологических измерений 10-м по логарифмическому закону турбулентного пограничного слоя, менялась в диапазоне от 22 до 40 м/с. Таким

образом были реализованы различные режимы ветроволновой обстановки, включая регулярное обрушение с образованием брызг. Для исследования событий, приводящих к генерации брызг, выполнялась высокоскоростная видеосъемка вида сбоку и сверху на взволнованную водную поверхность. Вид сбоку давал хорошую качественную информацию, однако из-за трехмерного характера неравномерно обрушающегося гребня не позволял провести идентификацию большинства событий и исследовать их характеристики. Основная информация была получена на основе анализа изображений, полученных съемкой сверху. При этом использовался теневой метод визуализации с подсветкой из-под воды с помощью матрицы мощных светодиодных светильников, расположенных под рассеивающим экраном. Съемка выполнялась высокоскоростной камерой NAC HX-3, со скоростью 4500 кадров/с и выдержкой 50 мкс. Область съемки оставила  $31 \times 24$  см, при разрешении  $1632 \times 1280$  пикселей. Таким образом, по сравнению с экспериментами в [7], было существенно увеличено пространственное разрешение с целью последующей детальной обработки полученных изображений. Количество записей варьировалось в зависимости от задаваемой скорости воздушного потока. При малых скоростях, когда волны обрушаются слабо и соответственно образуется мало брызг, требовалось больше записей, для получения ансамбля реализаций сопоставимого по размеру с условиями для высоких скоростей. Всего было сделано 50 записей по 32796 кадров.

Обработка велась с помощью специально разработанного программного обеспечения. С его помощью выполнялась разметка событий типа парашют во время всего процесса его эволюции (от зарождения до фрагментации купола). Пример обработки последовательности фрагментов кадра показан на рис. 2. По результатам разметки для каждого явления парашют определялись: начальный размер возмущения, из которого формируется купол, определяемый как расстояние между крайними маркерами в кадре  $D_1$ ; конечный размер купола  $D_2$ , определяемый как расстояние между крайними маркерами в кадре, где зафиксирован разрыв пленки; длительность - с момента начала формирования купола до момента разрыва его пленки  $\tau$ . Скорости движения краев и центра купола  $u_1$  и  $u_2$  рассчитывались как расстояние между соответственно серединами краевых маркеров или центров купола на начальном и конечном кадрах, деленное на  $\tau$ . При этом часто разметка велась в последовательности обратной во времени. Причина этого заключалась в том, что проще было вначале зафиксировать момент разрыва купола, а затем анализируя предшествующие кадры попытаться определить момент зарождения и оценить в том числе начальный размер.

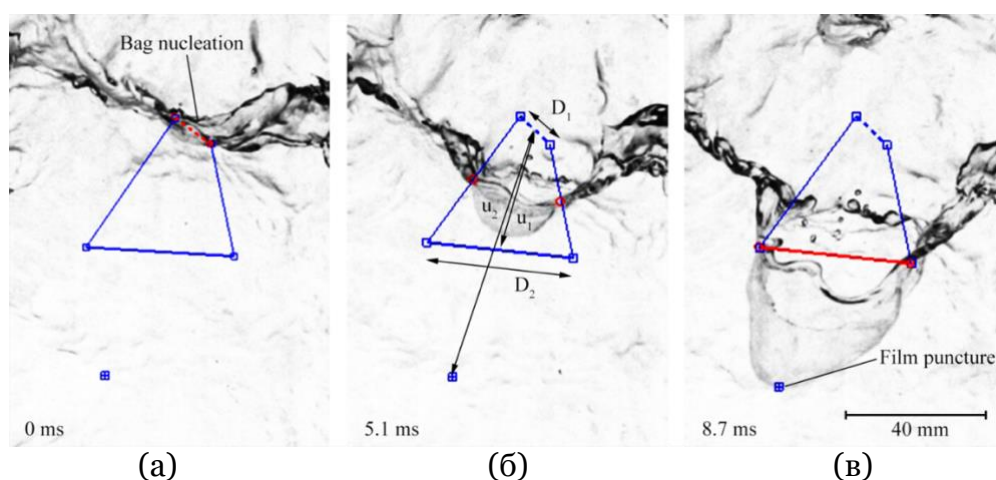


Рис. 2. Пример обработки последовательности кадров для определения характеристик «парашютов» на фрагментах изображений: а – начальный кадр (зарождение «парашюта»); б – промежуточный кадр с отметками границ; в – последний кадр в последовательности в момент разрыва пленки мембраны

По результатам были получены (рис.3) распределения перечисленных выше параметров явлений дробления типа парашют. Они были аппроксимированы гамма распределениями:

$$P_n(x) = \frac{n^n}{\Gamma(n)} x^{n-1} e^{-nx} \quad (1)$$

со следующими показателями  $n$ : для радиусов  $D_1$  и  $D_2$ ,  $n=8$ ; для скоростей  $u_1$  и  $u_2$ ,  $n=13$ ; для времени жизни  $\tau$ ,  $n=4$ .

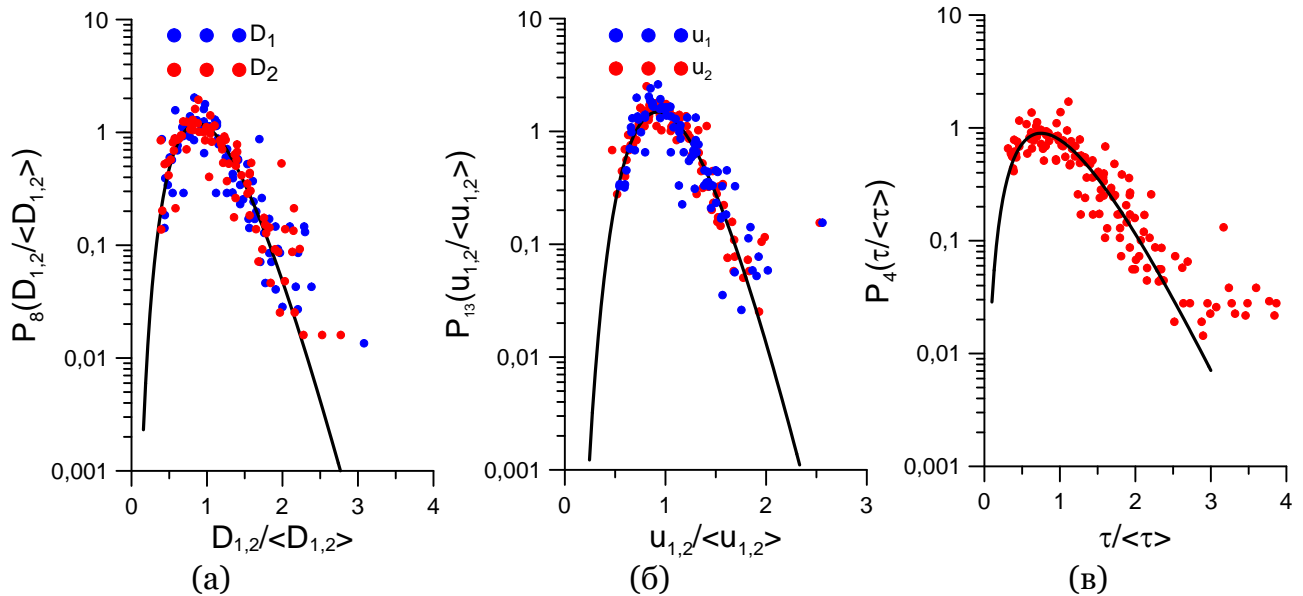


Рис. 3. Нормированные на средние значения распределения а) начального и конечного размера парашюта  $D_1$  и  $D_2$ , б) скорости центра купола и границ  $u_1$  и  $u_2$ , в) времени жизни  $\tau$

Полученные значения для средних значений представлены в виде зависимости от эквивалентной скорости  $U_{10}$ .

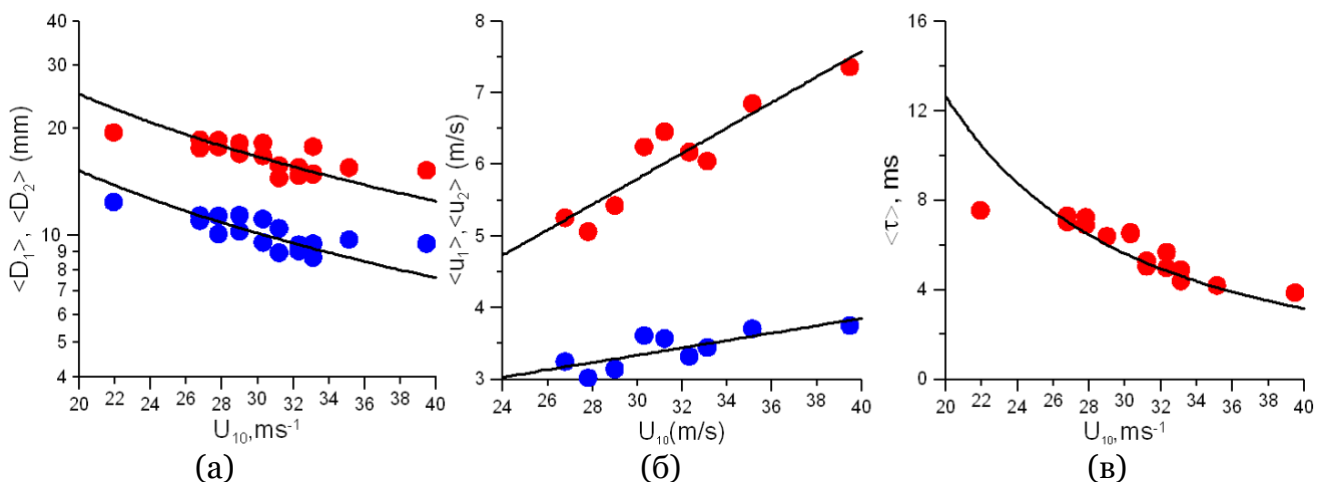


Рис. 3. Зависимости средних значений характеристик явлений дробления типа парашют от динамической скорости ветра: а – начального (синий) и конечного (красный) радиуса; б – скоростей краев (синий) и центра купола (красный); в – времени жизни. Линиями показаны степенные аппроксимации

Были предложены следующие степенные аппроксимации:

$$\langle D_1 \rangle = 3 \cdot 10^2 / U_{10} \quad (2)$$

$$\langle D_2 \rangle = 5 \cdot 10^2 / U_{10} \quad (3)$$

$$\langle u_1 \rangle = 1.8 + 0.05 \cdot U_{10} \quad (4)$$

$$\langle u_2 \rangle = 0.46 + 0.168 \cdot U_{10} \quad (5)$$

$$\langle \tau \rangle = 3 \cdot 10^2 / U_{10}^2 \quad (6)$$

Из рис. 3 видно, что с увеличением скорости воздушного потока, средний размер купола и время жизни уменьшается, а скорость надувания купола растет.

## 2. Эксперимент по исследованию процессов фрагментации типа парашют на поверхности тонких слоев жидкости

Эксперименты по исследованию механизмов срыва капель газовым потоком с поверхности тонких слоев жидкости проводились в горизонтальном канале прямоугольного сечения. Длина канала (ось  $x$ ) 2000 мм, ширина  $W$  ( $y$ ) – 161 мм,  $L$  высота ( $z$ ) – 25 мм. Вода подается через щелевой зазор на дно канала, где она увлекается вдоль  $x$  воздушным потоком со скоростью  $V_g$  от 20 до 35 м/с. Диапазон расхода жидкости составлял от 1 до 5 см<sup>3</sup>/с. Число Рейнольдса по высоте  $Re_L = q/Wv$ , определяемое через варьируемый расход жидкости  $q$ , изменялось в ходе экспериментов в диапазоне от 110 до 520.

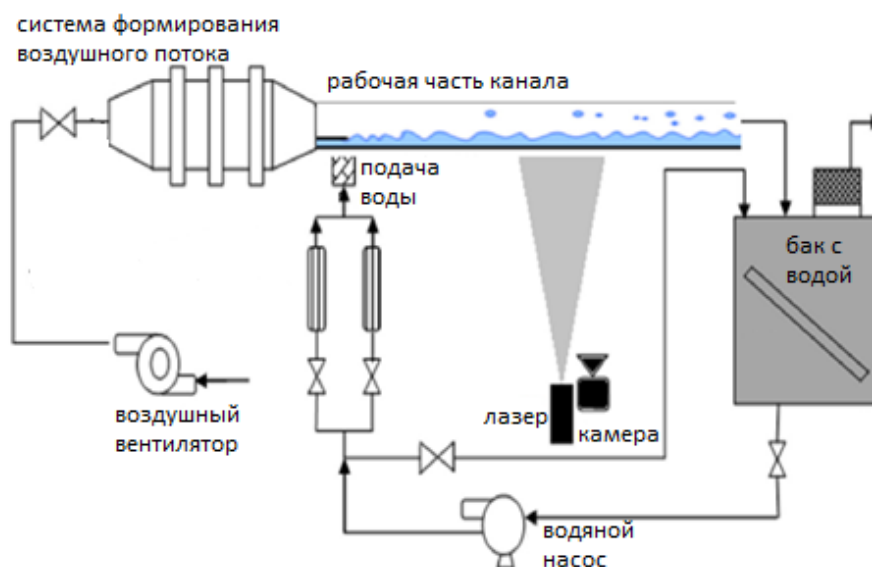


Рис. 4. Схема эксперимента по исследованию процессов генерации брызг при взаимодействии воздушного потока с тонким слоем воды.

В отличие от измерений в условиях глубокого слоя жидкости, описанных в предыдущих пунктах, здесь был использован метод лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) позволяющий получать полную картину пространственно-временного распределения толщины пленки в течении [9]. Измерения проводились на расстоянии 1600 мм от входа в канал с использованием стереоскопической модификации метода лазерно-индуцированной флуоресценции. Участок дна канала размерами 100 мм на 50 мм освещался снизу, сквозь прозрачное дно канала, рассеянным по площади лазерным пучком. Пучок создавался импульсным лазером с длиной волны излучения 527 нм. Свет лазера возбуждает флуоресцентное свечение родамина 6Ж, растворенного в рабочей жидкости в малой концентрации (15 мг/л). Свечение регистрировалось (также сквозь дно канала) скоростной камерой, оснащенной светофильтром с длиной волны пропускания 550 нм. По измеренной

таким образом локальной мгновенной яркости флюоресценции с использованием соответствующей калибровки, можно восстановить мгновенную локальную толщину пленки жидкости. Описанная методика получает данные в виде трехмерных массивов толщины пленки,  $h(x,y,t)$ , где  $t$  – время. Частота съемки составляет 10 кГц.

На рис. 5 показаны типичные изображения фронтов волн возмущений на поверхности жидкости обдуваемой потоком газа, на которых отчетливо заметны подковообразные структуры меньшего масштаба, движущиеся быстрее фронтов. Именно из этих структур периодически образуются парашюты (см. рис. 6). Однако многократное отражение лазерного излучения от тонкой пленки купола парашюта в сочетании с отражением от толстой пленки самого течения, приводит к искажениям получаемых изображений, которые намного сложнее обработать по сравнению с теневыми изображениями в предыдущих экспериментах. С другой стороны, источники возмущений на поверхности (волны быстрой ряби), из которых развиваются парашюты хорошо идентифицируются и могут быть размечены для получения количественной информации о них.

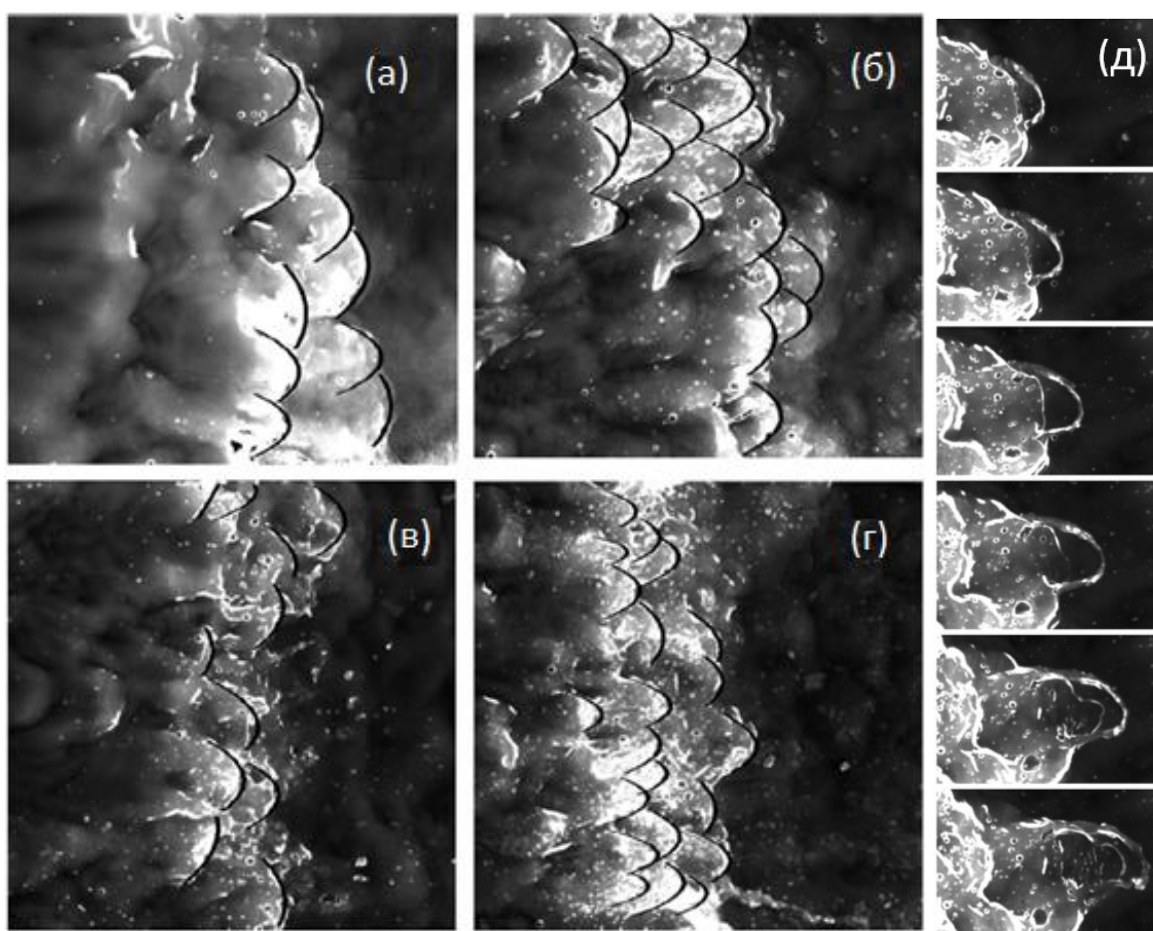


Рис. 5. Слева. Мгновенная форма волн быстрой ряби на поверхности волн возмущения для разных условий эксперимента  $Re_L = 360$ ,  $V_g = 20$  м/с (а), 25 м/с (б), 30 м/с (в), 35 м/с (г). Размер области  $50 \times 50$  мм. Справа на (д) показана последовательность полученных изображений одиночного явления типа парашютов для  $Re_L = 360$ ,  $V_g = 30$  м/с, область  $20 \times 13$  мм; Промежуток между кадрами составил 0.5 мс (увеличение времени соответствует движению вниз).

По результатам обработки изображений волн быстрой ряби удалось получить распределения, по которым были найдены средние значения ширины  $W_{fr}$  и скорости их движения  $V_{fr}$ . Они были сопоставлены с ранее найденными аналогичными характеристиками для самих парашютов (см. выше). Результаты сопоставления

продемонстрированы на рис. 6. Оказалось, что зависимость от  $Re_L$  слабая. При этом степенные зависимости для размера и скорости парашюта от скорости воздушного потока хорошо подошли для описания аналогичных зависимостей параметров волн быстрой ряби от скорости газового потока:

$$W_{fr} = 1.7 \cdot 10^2 / V_g \quad (7)$$

$$V_{fr} = 0.51 + 0.046 \cdot V_g \quad (8)$$

Следует отметить, что наклон зависимостей для границ движения парашютов  $u_1$  и скорости  $V_{fr}$  волн быстрой ряби практически совпали, что фактически подтверждает, что последние являются источниками для первых.

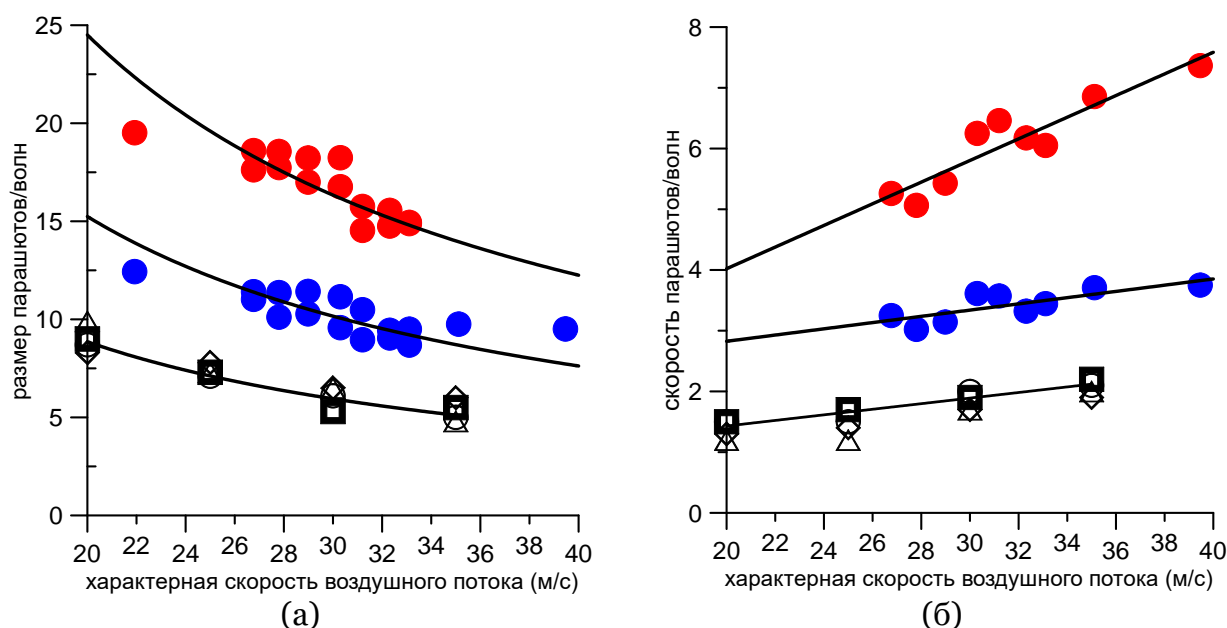


Рис. 7 Сопоставление зависимостей парашютов на глубокой воде и волн быстрой ряби на тонком слое (а) размеров, (б) скоростей. Красные и синие кружки аналогичны обозначениям на рис. 3. Черные символы соответствуют разным числам  $Re_L$  ( $\Delta$  - 155,  $\diamond$  - 220,  $\circ$  - 360,  $\square$  - 520)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения исследования продемонстрирован универсальный характер сценария фрагментации водной поверхности и образования брызг по типу парашют для принципиально разных условий взаимодействия газового потока со свободной поверхностью жидкости: глубокий слой жидкости с крупномасштабными волнами и тонкая пленка с волнами быстрой ряби на поверхности. Первый тип эксперимента был направлен на моделирование образования морского аэрозоля при взаимодействии ветра с морской поверхностью в лабораторных условиях. взаимодействия турбулентного пограничного слоя. Использовался теневой метод с высокоскоростной визуализацией. В свою очередь, процессы атомизации тонких пленок жидкости высокоскоростным потоком газа исследовались при помощи стереоскопической модификации метода лазерно-индуцированной флуоресценции. В первом эксперименте были получены данные о характерных размерах и скоростях парашютов, а во втором волн быстрой ряби (которые рассматриваются в качестве затравочных возмущений, из которых могут развиваться парашюты). Несмотря на различие характерных пространственных масштабов задач, зависимости размеров и скоростей парашютов и их затравок от скорости газового потока оказались близки к друг другу, что говорит об универсальности физических механизмов, определяющих эти явления в разных системах.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-19-00755 (проведение экспериментов). Работа Сергеева Д.А. выполнена в рамках темы госзадания ИПФ РАН № FFUF-2021-0007. Эксперименты выполнены на оборудовании Уникальной научной установки «Комплекс крупномасштабных геофизических стендов» ИПФ РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pilch M., Erdman C.A.** Use of Breakup Time Data and Velocity History Data to Predict the Maximum Size of Stable Fragments for Acceleration-Induced Breakup of a Liquid Drop // *Int. J. Multiphase Flow*. 1987. V. 13, no. 6. P. 741-757.
2. **Badie S., Lawrence C.J., Hewitt G.F.** Axial viewing studies of horizontal gas-liquid flows with low liquid loading // *International Journal of Multiphase Flow*. 2001 V. 27. P. 1259-1269.
3. **Cherdantsev A.V., Hann D.B., Azzopardi B.J.** Study of gas-sheared liquid film in horizontal rectangular duct using high-speed LIF technique: Three-dimensional wavy structure and its relation to liquid entrainment // *International Journal of Multiphase Flow*. 2014. V. 67. P. 52-64.
4. **Pham S.H., Kawara Z., Yokomine T., Kunugi T.** Detailed observations of wavy interface behaviors of annular two-phase flow on rod bundle geometry// *International journal of multiphase flow*. 2014. V. 59. P. 135-144.
5. **Lecoeur N., Zeng Y.J., Hale C.P., Hewitt G.F.** Visualization and Axial Viewing Techniques // *Multiphase Science and Technology*. 2011. V. 23. I. 1. P. 29-55.
6. **Veron F., Hopkins C., Harrison E.L., Mueller J.A.** Sea spray spume droplet production in high wind speeds // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. P. L16602.
7. **Troitskaya Y., Kandaurov A., Ermakova O., Kozlov D., Sergeev D., Zilitinkevich S.** Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. P. 1614.
8. **Troitskaya Y., Kandaurov A., Ermakova O., Kozlov D., Sergeev D., Zilitinkevich S.** The 'Bag Breakup' Spume Droplet Generation Mechanism at High Winds. Part I: Spray Generation Function // *J. Phys. Oceanogr.* 2018. V. 48. I. 9. P. 2167-2188.
9. **Cherdantsev A.V., Hann D.B., Azzopardi B.J.** Study of gas-sheared liquid film in horizontal rectangular duct using high-speed LIF technique: Three-dimensional wavy structure and its relation to liquid entrainment // *International Journal of Multiphase Flow*. 2014. V.67. P.52-64.



# Investigation of the Spray Generation due to Bag Breakup Fragmentation Phenomena with Optical Methods in Environmental and Technical Systems

D.A. Sergeev<sup>1</sup>, Y.I. Troitskaya<sup>2</sup>, A.V. Cherdantsev<sup>3</sup>

IAP RAS, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-4910-3935 , [daniil@ipfran.ru](mailto:daniil@ipfran.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-3818-9211 , [yuliyatrinity@mail.ru](mailto:yuliyatrinity@mail.ru)

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0003-4011-753X, [cherdantsev@itp.nsc.ru](mailto:cherdantsev@itp.nsc.ru)

## Abstract

This paper discusses the results of a detailed study of bag breakup spray fragmentation process obtained using various panoramic optical methods: shadow imaging and laser-induced fluorescence (LIF) with high-speed video recording. The experiments were carried out in two fundamentally different configurations. When blowing the air flow above a deep-water layer, with the presence of large-scale waves on the surface, and vice versa in conditions of thin layers of liquid. Comparison of the results of observations demonstrated not only the general similarity of the evolution scenario, but also the dependences of the spatiotemporal scales of the process of fragmentation and the formation of droplets on the characteristic flow velocities according to the bag breakup events. This indicates the universal nature of the phenomena leading to the fragmentation and separation of drops from the surface of a liquid blown by a gas flow in natural and technical hydrodynamic systems of a wide class with scales varying over a wide range.

**Keywords:** droplets, fragmentation, thin films, laboratory modeling, shadow method, LIF, high speed filming.

## References

1. Pilch M., Erdman C.A. Use of Breakup Time Data and Velocity History Data to Predict the Maximum Size of Stable Fragments for Acceleration-Induced Breakup of a Liquid Drop // *Int. J. Multiphase Flow*. 1987. V. 13, no. 6. P. 741-757.
2. Badie S., Lawrence C.J., Hewitt G.F. Axial viewing studies of horizontal gas-liquid flows with low liquid loading // *International Journal of Multiphase Flow*. 2001 V. 27. P. 1259-1269.
3. Cherdantsev A.V., Hann D.B., Azzopardi B.J. Study of gas-sheared liquid film in horizontal rectangular duct using high-speed LIF technique: Three-dimensional wavy structure and its relation to liquid entrainment // *International Journal of Multiphase Flow*. 2014. V. 67. P. 52-64.
4. Pham S.H., Kawara Z., Yokomine T., Kunugi T. Detailed observations of wavy interface behaviors of annular two-phase flow on rod bundle geometry// *International journal of multiphase flow*. 2014. V. 59. P. 135-144.
5. Lecoeur N., Zeng Y.J., Hale C.P., Hewitt G.F. Visualization and Axial Viewing Techniques // *Multiphase Science and Technology*. 2011. V. 23. I. 1. P. 29-55.
6. Veron F., Hopkins C., Harrison E.L., Mueller J.A. Sea spray spume droplet production in high wind speeds // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. P. L16602.
7. Troitskaya Y., Kandaurov A., Ermakova O., Kozlov D., Sergeev D., Zilitinkevich S. Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. P. 1614.

8. Troitskaya Y., Kandaurov A., Ermakova O., Kozlov D., Sergeev D., Zilitinkevich S. The 'Bag Breakup' Spume Droplet Generation Mechanism at High Winds. Part I: Spray Generation Function // *J. Phys. Oceanogr.* 2018. V. 48. I. 9. P. 2167-2188.
9. Cherdantsev A.V., Hann D.B., Azzopardi B.J. Study of gas-sheared liquid film in horizontal rectangular duct using high-speed LIF technique: Three-dimensional wavy structure and its relation to liquid entrainment // *International Journal of Multiphase Flow.* 2014. V.67. P.52-64.