

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ  
В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 556.08

СИСТЕМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ БРЫЗГ  
ПРИ ВЕТРОВОЛНОВОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ  
В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

© 2021 г. А. А. Кандауров, Д. А. Сергеев, Ю. И. Троицкая

Поступила в редакцию 18.08.2020 г.  
После доработки 23.08.2020 г.  
Принята к публикации 26.08.2020 г.

DOI: 10.31857/S0032816221010286

Для моделирования процессов взаимодействия атмосферы и гидросферы в лабораторных условиях широко используются ветроволновые каналы. Вне зависимости от конструкции и характеристик в их состав обычно входят стандартное оборудование, включая системы подготовки воздушного потока, элетромеханические волнопродукторы, системы регулирования температуры воды и воздуха в канале и т.д. В последнее время значительное внимание уделяется исследованию механизмов генерации и брызг, так как они играют важную роль в процессах обмена (импульсом, теплом, влагой) между атмосферой и гидросферой, особенно при ураганных условиях [1]. Наблюдения [2] показывают, что основной процесс образования брызг может быть связан с появлением мелкомасштабного возвышения на водной поверхности, из которого затем ветром раздувается купол тонкой пленки, окруженной более толстым “ободком”, и в конце лопается, образуя сотни брызг. Спорадический характер образования брызг в естественных условиях затрудняет детальное исследование процессов и набор необходимого ансамбля для последующей статистической обработки.

В данной работе описана электронно-гидравлическая импульсная система искусственного инициирования генерации брызг и его видеорегистрации в условиях лабораторного моделирования на ветроволновом термостратифицированном канале – в.в.т.с.к. (рис. 1). Она обеспечивает создание затравки – возвышения на поверхности, из которого образуются брызги. Сигналы включения и отключения клапанов, насоса и камеры подаются с контроллера Arduino со специальной программой. Ранее в работе [2] было отмечено, что брызги образуются на гребнях волн. Таким образом, нам необходимо было обеспечить инициирование возмущения на поверхности при необходимой фазе волны (гребня). Для этого в систему включен струнный волнограф,

расположенный в непосредственной близости к области наблюдения, на расстоянии 5 см (см. рис. 1). На рис. 2а приведена схема гидравлической части системы искусственного создания возмущения свободной поверхности, которая функционирует следующим образом.

В начале клапан 3 (рис. 2а) открывается на 3.3 с, и вся система прокачивается от пузырьков и наполняется водой, забираемой насосом 9 за время 3 с, при закрытом клапане 4. Далее выдерживается пауза, во время которой в течение 1 с с помо-

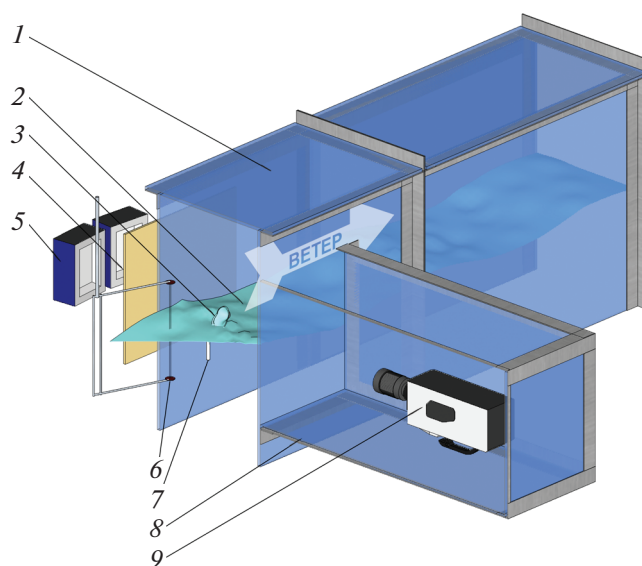
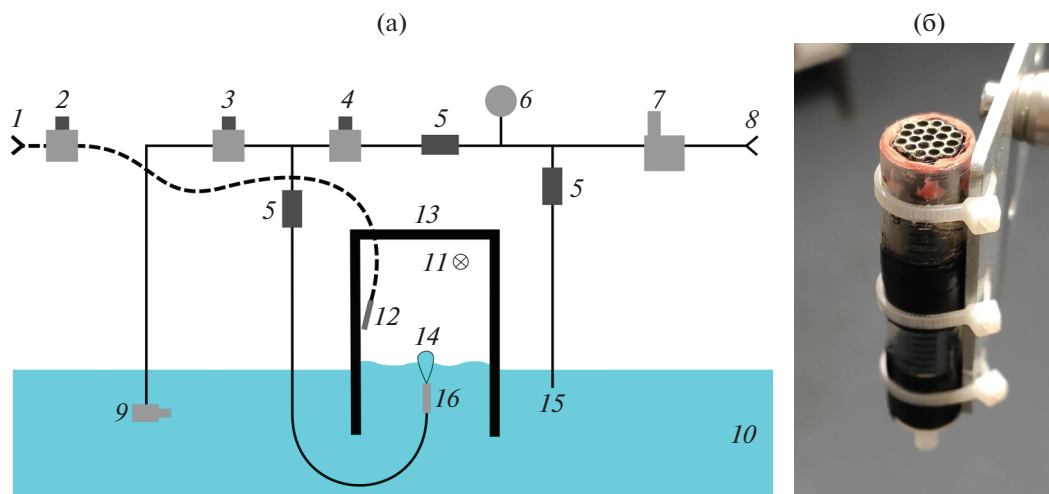


Рис. 1. Схема системы моделирования генерации брызг на каналах включая систему видеорегистрации на примере тестового эксперимента в.в.т.с.к. 1 – корпус канала; 2 – взволнованная поверхность; 3 – искусственное возмущение на поверхности, при котором образуются брызги; 4 – матовый экран; 5 – светодиодные светильники; 6 – струнный волнограф; 7 – сопло для создания возмущения поверхности; 8 – герметичный бокс; 9 – камера.



**Рис. 2.** а – схема гидравлической части в сечении канала (1 – сжатый воздух; 2 – клапан сдува; 3 – клапан прокачки; 4 – клапан затравки; 5 – регулирующие вентили; 6 – манометр; 7 – редуктор; 8 – водопровод; 9 – насос прокачки; 10 – поверхность воды; 11 – направление ветра в канале; 12 – сопло сдува каплей; 13 – стенка канала; 14 – возмущение поверхности; 15 – дренаж; 16 – сопло для создания возмущения на поверхности); б – внешний вид сопла.

стью подачи сжатого воздуха под давлением 5 бар через сопло с внутренней поверхности боковой стенки канала удаляются мешающие обзору камеры капли воды, образующиеся от волн и брызг естественным образом.

После этого система находится в режиме ожидания команды на инициирование возмущения. Эта команда выдается на основе результатов обработки сигнала с волнографа, которая выполняется в реальном времени следующим образом. С помощью программного обеспечения с частотой 300 Гц контроллер анализирует сигнал с волнографа, сглаживая его с помощью экспоненциальной фильтрации. Одновременно выполняются две процедуры фильтрации с разными постоянными времени: медленная с постоянной времени 30 с, много большей периода волны для определения значения сигнала волнографа, соответствующего среднему положению поверхности; и быстрая с постоянной времени 0.1 с для определения текущего положения поверхности с фильтрацией шумов исходного сигнала.

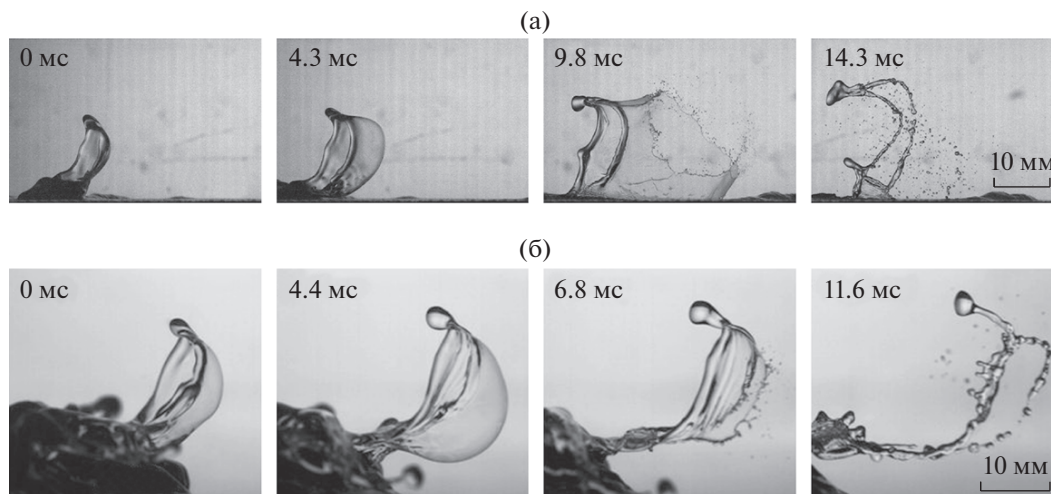
Контроллер детектирует проход гребня волны через волнограф по наличию локального максимума по трем точкам в быстро сглаженном сигнале при условии превышения среднего уровня поверхности. После того, как контроллер детектировал прохождение гребня волны через волнограф, делается пауза длительностью 400 мс, чтобы гребень прошел расстояние до места расположения сопла. После заданной паузы на 20 мс открывается клапан 4. При этом вода из штатного водопровода через редуктор под давлением 3 бар поступает через регулировочные вентили в систему и вытравливает жидкость, которой заполнена система, из-

под поверхности воды через подводное сопло, инициируя возмущение на поверхности.

Сопло, представляющее собой трубку внутренним диаметром 1 см, располагалось вертикально на расстоянии 15 мм от поверхности. На конце сопла установлен хонейкомб, обеспечивающий однородный П-образный профиль вертикального течения возмущения (см. рис. 2б). Дренаж 15 (рис. 2а) необходим для корректной работы редуктора с поддержанием постоянного давления, которое контролируется манометром 6. Видеорегистрация также запускается по команде контроллера: триггер сигналом через 60 мс после открытия клапана 4 для создания возмущения. В наших тестовых экспериментах она велась сбоку (см. рис. 1) скоростной камерой NAC Memtecam НХ-3 с частотой съемки 3990 кадров/с, выдержкой 50 мкс, разрешением 2560 × 960 пикселей. Давление на редукторе, параметры сопла и временные интервалы работы элементов системы были подобраны по результатам анализа видеосъемки процесса. Она протестирована в экспериментах на ветроволновом термостратифицированном канале ИПФ РАН (см. [3]).

На рис. 3 показан пример последовательности полученных изображений процесса образования брызг из искусственно инициированного возмущения на волне в в.в.т.с.к., которые сравниваются с полученными ранее естественным образом в работе [2].

**Основные технические характеристики.** Рабочее давление воды в гидравлической системе 3 бар. Хонейкомб на конце сопла состоит из тонкостенных (0.1 мм) трубочек  $\varnothing 2$  мм. Характерная ширина затравки искусственного возмущения составила



**Рис. 3.** а – последовательность кадров высокоскоростной съемки образования брызг из искусственного возмущения в экспериментах на в.в.т.с.к.; б – образование брызг естественным образом [2].

1 см, что соответствует естественным условиям. Минимальный период повторения искусственного возмущения 5.62 с.

Подобной системой генерации можно оснастить практически любой ветроволновой канал, а также использовать в различных экспериментальных задачах многофазной термогидродинамики.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 19-17-00209 (разработка аппаратной части системы искусственной генерации), проектов РФФИ 18-35-20068, 19-05-00249, 18-05-60299 (разработка системы оптической схемы видеорегистрации), работа Кандаурова А.А. была поддержана грантом Президента молодым ученым МК-3184.2019.5. Эксперименты выполнены на

уникальной научной установке “Комплекс крупномасштабных геофизических стендов ИПФ РАН”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Veron F. // Annu. Rev. Fluid Mech. 2015. V. 47. P. 507.
2. Troitskaya Yu.I., Kandaurov A.A., Ermakova O.S., Kozlov D.S., Sergeev D.A., Zilitinkevich S.S. // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 1614. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01673-9>
3. Troitskaya Yu.I., Sergeev D.A., Kandaurov A.A., Baidakov G.A., Vdovin M.A., Kazakov V.I. // J. Geophys. Res. Ocean. 2012. V. 117. № C11. P. C00J21. <https://doi.org/10.1029/2011JC007778>

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