

Д.А.Сергеев^{1,2}, Г.А.Байдаков^{1,2}, М.И.Вдовин^{1,2},
А.А.Кандауров^{1,2}, Ю.И.Троицкая^{1,2}

¹*Институт прикладной физики РАН, г.Нижний Новгород*

²*Нижегородский государственный университет
им.Н.И.Лобачевского, г.Нижний Новгород*

КОМПЛЕКСНОЕ ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ МЕТЕОУСЛОВИЯХ

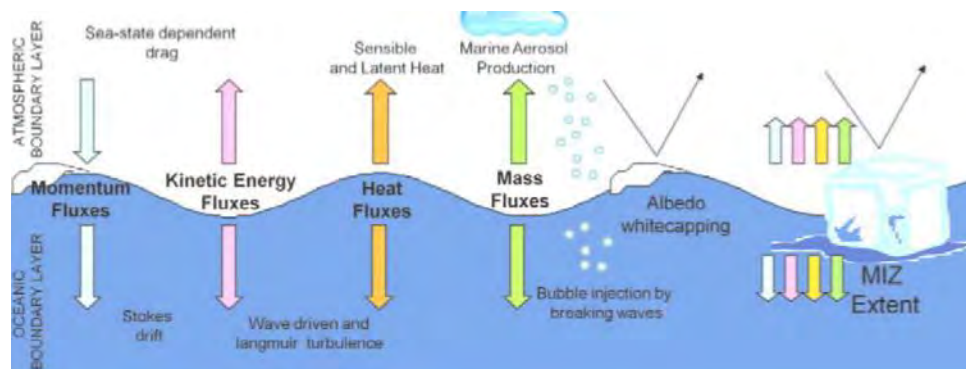
Представлены результаты исследований процессов ветро-волнового взаимодействия в рамках лабораторного моделирования на высокоскоростном ветро-волновом термостратифицированном канале Института прикладной физики РАН с использованием контактных, а также наиболее современных оптических методов, основанных на визуализации. Эксперименты выполнены в широком диапазоне скоростей ветра, включая ураганные (до 45 м/с при пересчете на 10-ти метровую высоту для натуральных условий), с интенсивным обрушением волн и образованием брызг. Результаты одновременных измерений параметров ветра и волнения позволили предложить объяснение эффекта тенденции к насыщению коэффициента сопротивления (обмена импульсом) при ураганных скоростях ветрах за счет насыщения уклона волнения. Исходя из важности роли брызг в процессах обмена, впервые выполнена попытка исследования процессов генерации брызг при помощи высокоскоростной видеосъемки.

Ключевые слова: *пограничные слои, атмосфера, океан, ураганы, лабораторное моделирование*

Введение. Взаимодействие атмосферы и гидросферы в пограничных слоях является важнейшим фактором формирования погоды и климата в краткосрочной и долгосрочной перспективе, как на региональном, так и на глобальном уровне. Современные численные модели прогноза гидрометеорологической обстановки не позволяют разрешить вертикальные масштабы порядка десятков длин волн на границе раздела, в которых сосредоточены мелкомасштабные, зачастую турбулентные процессы, связанные с ветро-волновым взаимодействием. Эти многообразные процессы (совокупность которых условно отображена на рис.1 [1]), включающие в себя генерацию ветром дрейфовых течений, волн, их распространение, обрушение с образованием брызг и пены, подводных пузырьков, взаимодействия с ледяным покровом и т.д., определяют процессы обмена импульсом, энергией, теплом, влагой, газами. Эмпирические зависимости коэффициентов, характеризующие обмен, от метеорологических условий и, в первую очередь, скорости ветра, являются основными входными данными для численных расчетов. Соответственно точность прогнозов определяется достоверностью выполненных измерений, и для экстремальных погодных условий она будет существенно ниже, т.к. при этом измерения в реальных условиях сильно затруднены. В этом случае хорошей альтернативной натурных экспедицион-

© Д.А.Сергеев, Г.А.Байдаков,

М.И.Вдовин, А.А.Кандауров, Ю.И.Троицкая, 2016

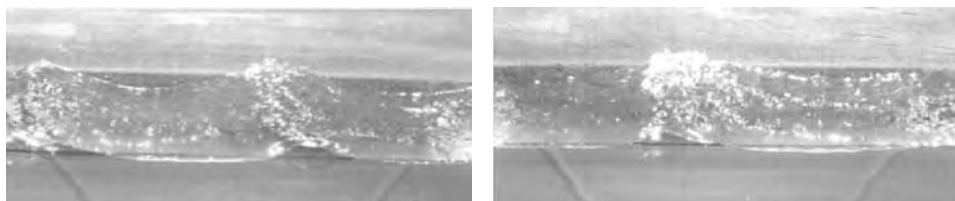


Р и с . 1 . Схематическое изображение мелкомасштабных процессов, определяющих обмен между атмосферой и гидросферой в пограничных слоях (из работы [1]).

ных исследований является моделирование на крупномасштабных ветро-волновых установках [2, 3]. Еще один несомненный плюс лабораторного моделирования заключается в возможности контроля различных процессов и разделения их вклада в обмен. Так, например, возможность контролируемого изменения температур воды и воздуха позволяет исследовать влияние стратификации пограничных слоев на обменные процессы, также контролируемо может создаваться пена и моделироваться лед и т.д. В настоящей работе приводятся результаты лабораторного моделирования процесса обмена импульсом при ураганных метеоусловиях, а также процессов генерации брызг.

Схема эксперимента по исследованию обмена импульсом при ветро-волновом взаимодействии на высокоскоростном ветро-волновом термостратифицированном канале. Эксперименты проводились на высокоскоростном ветро-волновом термостратифицированном канале Института прикладной физики РАН. Параметры установки позволяют моделировать ветро-волновое взаимодействие в пограничных слоях атмосферы и океана при экстремальных метеоусловиях (создаваемая эквивалентная скорость ветра до 45 м/с) и позволяет реализовывать режим регулярного обрушения волн с образованием брызг (см. пример на рис.2).

Прямая часть воздушного канала, установленного на вертикальных стойках в основной чаше Большого термостратифицированного бассейна над водной поверхностью, имеет П-образное сечение и общую длину 10 м. Рабочее сечение воздушного потока составляет $0,4 \times 0,4$ м (более подробное описание установки см. в [3]). Общая схема канала и расположение измери-



Р и с . 2 . Переход от необрушающихся волн (слева) к обрушающимся волнами (справа) при увеличении эквивалентной скорости ветра с 22 до 27 м/с.

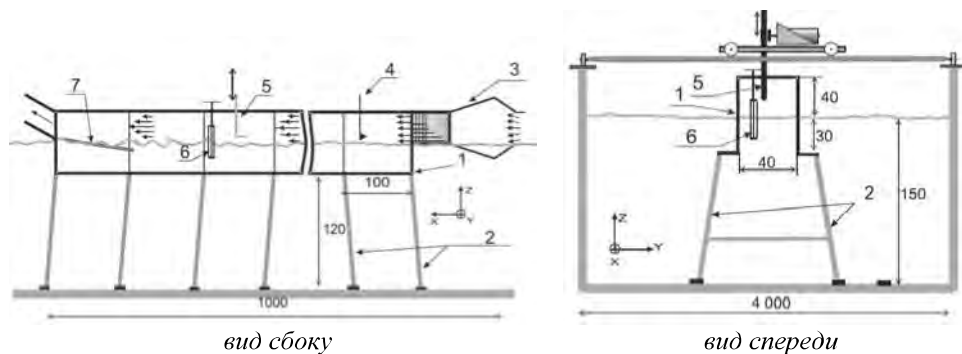


Рис. 3. Схема эксперимента, поперечное сечение канала: корпус воздушного канала (1), вертикальные стойки (2), расширяющее – сужающая секция на входе в канал (3), термоанемометр для контроля параметров входного потока (4), трубка Пито на сканирующем устройстве на расстоянии 8 м от начала канала (5), трехканальный струнный волнограф (6), пляж-волногаситель (7).

тельных средств для исследования процессов обмена импульса контактными методами представлена на рис.3.

Результаты измерений параметров воздушного потока и волнения и их сопоставление. Методом вертикального сканирования с помощью трубки Пито были получены профили средней скорости в 8 м от начала канала (рис.4). По ним с учетом гипотезы об автомодельном характере профиля в канале были найдены сдвиговое напряжение u^* (скорость трения), пересчитана скорость эквивалентная скорость U_{10} для высоты 10 м и найден коэффициент обмена импульса или аэродинамического сопротивления $C_{D10N} = u^{*2}/U_{10}^2$ (определяется по аналогии с обтеканием твердой шероховатой поверхности).

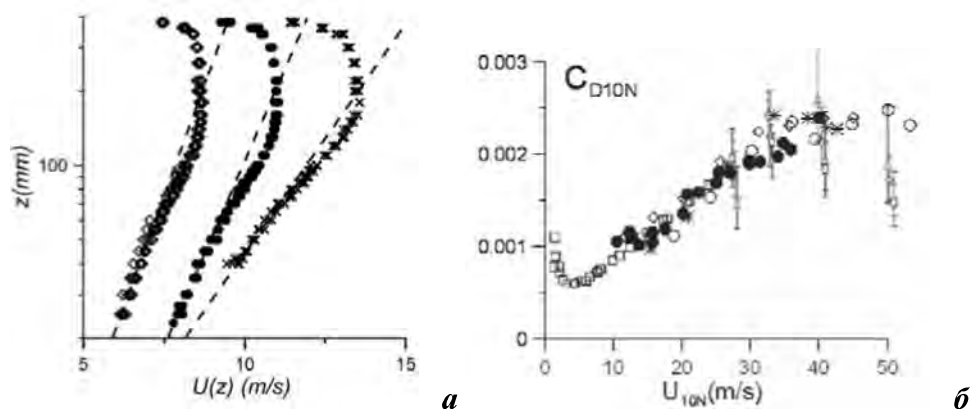
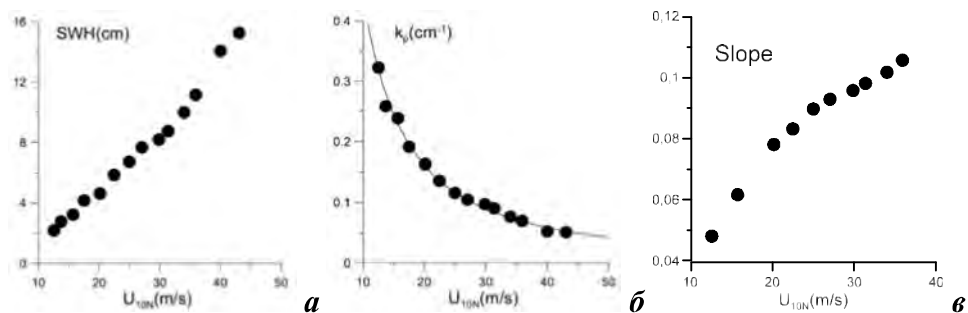


Рис. 4. Примеры измеренных профилей скорости в канале (символы) и аппроксимация логарифмическими зависимостями в области турбулентного пограничного слоя с постоянным потоком импульса (*штриховые линии*) (а); найденные значения C_{D10N} (б). Открытые символы с доверительными интервалами – результаты натурных исследований ураганов [2], просто открытые символы – результаты лабораторного эксперимента [4], сплошные символы – результаты настоящей работы.



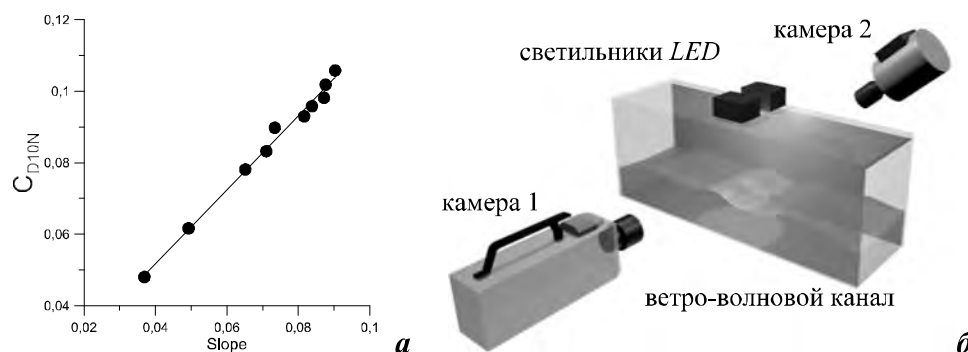
Р и с . 5. Зависимость значительной высоты волнения от скорости ветра SWH (а), аналогичная зависимость пикового волнового числа k_p (б), зависимость среднего уклона $Slope$ (в).

Из рис.4 видно, что наши результаты неплохо совпадают с ранее полученными и подтверждают тенденцию к насыщению аэродинамического сопротивления.

По данным измерений трехканальным струнным волнографом, расположенным рядом с трубкой Пито, с использованием FDM метода были получены спектры, как частотные, так и по волновым числам. Это позволило определить значения энергонесущих частоты и волнового числа, соответствующих пикам в спектрах, без дисперсионного соотношения. Далее была найдена зависимость значительной высоты волнения SWH и волнового числа пика k_p , а также (крутизны) $Slope = SWH \cdot k_p / 4$, от скорости ветра U_{10} (рис.5).

Видно, что зависимость уклона также имеет тенденцию к насыщению. Поэтому была построена зависимость $C_{D10N}(Slope)$ (см. рис. 6 а), которая демонстрирует линейный характер. На основе это результата можно выдвинуть гипотезу о том, что тенденция к насыщению коэффициента аэродинамического сопротивления определяется аналогичным характером поведения для уклона, т.е. несмотря на рост амплитуды и увеличении длины волны происходит стабилизация средней формы.

Исследование процесса генерации брызг с помощью высокоскоростной видеосъемки. Как показывают теоретические исследования, брызги играют важную роль в процессах обмена и, в первую очередь, импульсом и теплом. При этом необходимо не только уметь измерять концентрацию брызг и



Р и с . 6. Зависимость $C_{D10N}(Slope)$ с линейной аппроксимацией (а), схема эксперимента по визуализации обрушений волн с образованием брызг (б).



Р и с . 7 . Последовательные во времени кадры образования «мембраны» и ее разрушения на капли (а), зависимость числа мембран, возникающих в единицу времени на единице площади поверхности воды, от скорости ветра (б).

их скорости, но исследовать механизмы их образования. Для этого впервые выполнены экспериментальные исследования с использованием многоракурсной высокоскоростной (до 10000 кадров секунду) видеосъемки (схема на рис.6, б).

На изображениях сбоку (рис.7, а) видно, что на поверхности воды формируются и развиваются объекты, которые представляют собой тонкостенные «пузыри» или «мембраны», которые раздуваются воздушным потоком, а затем лопаются, образуя брызги. Наблюдаемое явление может быть объяснено как особый вид неустойчивости границы раздела воды и воздуха «*bag break-up*», который хорошо известен в теории дефрагментации жидкостей. Полученные одновременно изображения сверху позволили оценить количество подобных объектов (рис.7, б).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 14-05-91767, 15-35-20953, 16-05-00839. Разработка и подготовка измерительного комплекса выполнена при поддержке грантов РНФ 14-17-00667, 15-17-20009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cavaleri L., Fox-Kemper B., Hemer M.* Wind waves in the coupled climate system // Bull. Amer. Meteor. Soc.– 2012.– 93.– P.1651–1661.
2. *Troitskaya Yu.I., Sergeev D.A., Kandaurov A.A., Baidakov G.A., Vdovin M.A., Kazakov V.I.* Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions // J. Geop. Res.– 2012.– v.117, C00J21.– 13 p.
3. *Troitskaya Yu., Sergeev D., Kandaurov A., Kazakov V.* Air-sea interaction under hurricane wind conditions / Recent Hurricane Research – Climate, Dynamics, and Societal Impacts.– 2011.– P.248-260.
4. *Powell M.D., Vickery P.J., Reinhold T.A.* Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones // Nature.– 2003.– v.422.– P.279-283.

Материал поступил в редакцию 14.03.2016 г.

D.A.Sergeev, G.A.Baydakov, M.I.Vdovin,
A.A.Kandaurov, Yu.I.Troitskaya

**INTEGRATED LABORATORY SIMULATION OF ATMOSPHERE
AND HYDROSPHERE INTERACTION
UNDER EXTREME WEATHER CONDITIONS**

The study of wind-wave interaction is introduced in the framework of laboratory modeling using the high-speed wind-wave thermostratified channel by the Institute of Applied Physics. As contact methods as well as the most advanced optical techniques based on visualization are used. The experiments were performed in a wide range of wind speeds, including hurricane-force (up to 45 m/s in terms of 10-meter height for in situ conditions), with an intense wave breaking and splashes. The simultaneous measurements of wind and wave parameters allow explaining the trend towards saturation of resistance coefficient (momentum exchange) with hurricane wind speeds by wave tilt saturation. On the assumption of the importance of spray during exchange, for the first time the splash generation was investigated using high-speed video.

KEYWORDS: boundary layers, atmosphere, ocean, hurricanes, laboratory simulation