

УДК 551.468

Д.А. Сергеев, М.И. Вдовин, А.А. Кандауров, Г.А. Байдаков, Ю.И. Троицкая

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PIV-МЕТОДОВ ПРИ ЛАБОРАТОРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ШТОРМОВЫХ И УРАГАННЫХ УСЛОВИЙ В ОКЕАНЕ

АННОТАЦИЯ

На Ветро-волновом канале ИПФ РАН выполнены лабораторные эксперименты по исследованию структуры воздушного турбулентного пограничного слоя над волнами при условиях, моделирующих приводный пограничный слой атмосферы при сильном и ураганном ветре, при эквивалентных скоростях ветра на стандартной высоте 10 м от 10 до 48 м/с. С использованием модифицированной техники цифровой оптической анемометрии (PIV) получены осредненные по турбулентным пульсациям поля скорости воздушного потока над поверхностью воды, искривленной волной, и средние профили скорости ветра.

ВЕТЕР, ВОЛНЫ, ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, PIV

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие ветрового потока с поверхностными волнами является одной из центральных проблем исследования и параметризации процессов обмена между атмосферой и океаном в пограничных слоях [1]. Предметом настоящей работы является исследование характеристик высокоскоростных воздушных потоков в условиях интенсивного обрушения волн с образованием брызг вблизи взволнованной поверхности, в том числе, во впадинах волн. Ранее измерения в условиях сильных ветров с эквивалентной скоростью ветра $U_{10} > 25$ м/с при лабораторном моделировании экстремальных метеоусловий проводились лишь с помощью контактных датчиков (трубок Пито и термоанемометров) на значительном удалении от гребней поверхностных волн. При этом область измерения располагалась выше слоя постоянных потоков, где профиль скорости логарифмический (не подвержен искажению за счет конечного размера канала по высоте). Поэтому его параметры не могли бы быть определены непосредственно с помощью профильного метода. Измерения в непосредственной близости, в том числе во впадинах волн может быть выполнено только с помощью бесконтактных методов, например, основанных на визуализации. В настоящей работе представлены результаты измерений с помощью техники PIV, аналогичной применявшейся в работе [2], скорости воздушного потока над волнами в лабораторных условиях, моделирующих сильные и ураганные ветра.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты проводились на 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. Подробное описание этой установки, принципов создания и управления воздушным потоком в ней приведено в [3, 4]. Общая схема экспериментов представлена на рис. 1.

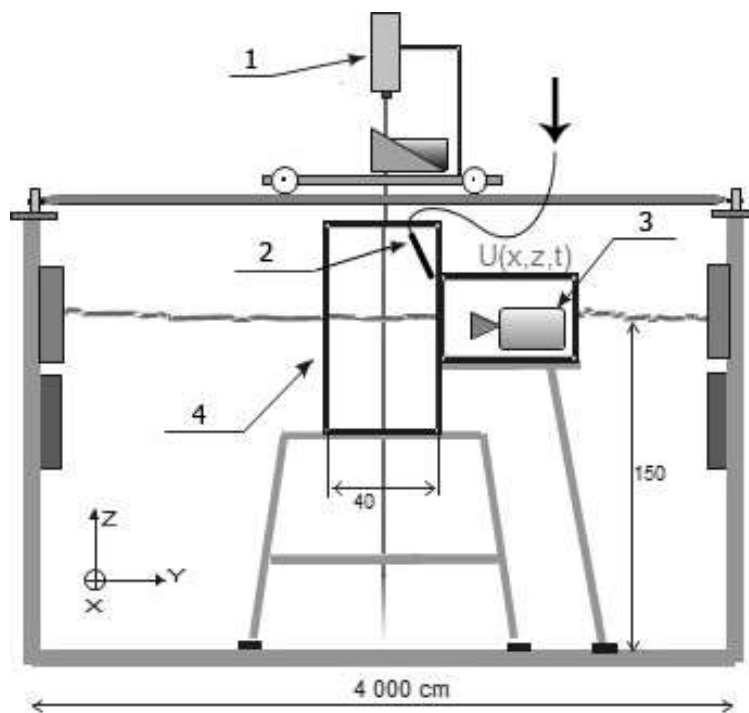


Рис. 1. Схема эксперимента, поперечное сечение канала: 1 – лазер подсветки, 2 – система сдува капель, 3 – скоростная видеокамера, 4 – рабочая часть канала

Наряду с PIV-методами, которые являлись основным инструментом в настоящих исследованиях, использовались ранее опробованные контактные способы измерений. С помощью термоанемометра, расположенного на оси канала в первой секции контролировались параметры потока на входе в канал, где количество брызг сравнительно мало и вероятность повреждения датчика невелика. В рабочей секции канала, на расстоянии 7 м от входа, средние профили скорости воздушного потока измерялись с помощью системы трубки Пито и дифференциального измерителя давления MKS Baratron 226 А. Измерения профилей проводились методом вертикального сканирования по нескольким горизонтам. На каждом горизонте проходило накопление сигнала в течение одной минуты. Для проведения измерений с помощью PIV-методов, все контактные датчики убирались из канала, чтобы не вносить возмущения.

Для визуализации воздушного потока в канале использовались частицы полиамида сферической формы средним диаметром 20 мкм, плотностью $1,02 \text{ г/м}^3$. Время инерции частиц составляло $7 \cdot 10^{-4}$ с. Устройство для ввода частиц (засеивающее устройство) располагалось на входе в канал. По своей конструкции оно было аналогично устройству, применявшемуся в работе [5], и использует в своей работе сжатый воздух для инжекции. Расстояние от трубки до снимаемой на камеру области составляло 6 метров. Устройство позволяло создавать однородный засев области наблюдения длительностью до 0,5 секунды с высокой плотностью частиц. Специальные тестовые эксперименты продемонстрировали, что система не вносит искажений в ветровой поток в области проведения измерений (вдоль оси канала), ни в статическом состоянии, ни во время осуществления инжекции.

Для применения PIV-метода движение частиц в воздухе в области измерений на расстоянии 8 м от входа в канал подсвечивалось вертикальным лазерным ножом по оси канала. Плоскость ножа формируется цилиндрической линзой из вертикального лазерного пучка (непрерывный Nd-YAG лазер, 532 нм, 4 Вт). Ширина области засветки менялась выбором радиуса цилиндрических линз и их взаимного расположения. Она выбиралась исходя из необходимости поддержания необходимого контраста границы раздела вода-воздух на уровне, достаточном для возможности определения границы раздела с помощью оптических методов для случая низких скоростей ветра и для получения максимальной интенсивности в случае высоких скоростей, когда форма поверхности в основном определяется по показаниям волнографа.

Движение внесенных в воздушный поток частиц и поверхности воды, освещенных лазерным ножом, снималось сбоку с помощью высокоскоростной камеры ВИДЕОСПРИНТ, размещенной горизонтально в герметичном боксе (рис. 1).

С внутренней стороны боковой стенки канала, через которую производится съемка, была установлена система сдува капель в виде металлической трубки диаметром 4 мм в которую по силиконовом шлангу подается сжатый воздух. Как показали тестовые эксперименты, система не вносила искажений в ветровой поток в области проведения измерений (вдоль оси канала).

Эксперименты проводились при четырех значениях расхода воздуха в канале: 1,1; 1,6; 2,2 и 2,7 м³/с что, как будет показано ниже, соответствует эквивалентным скоростям ветра на высоте 10 м, U_{10} , 11, 20, 37 и 48 м/с соответственно. В двух последних случаях наблюдалось сильное обрушение волн с образованием пенного гребня и интенсивной генерацией брызг.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Определения формы границы раздела вода-воздух

Определение формы поверхности волн для каждого кадра необходимо для нахождения поля скорости путем кросскорреляционной обработки адаптивным PIV-алгоритмом по криволинейной сетке в непосредственной близости от водной поверхности, в том числе во впадинах волн. Ранее для определения формы поверхности по изображениям с высокоскоростной камеры был разработан пошаговый алгоритм [6] на основе метода Канни [7]. Этот метод хорошо работал в условиях слабообрушающихся (капиллярная рябь) волн без образования пенных гребней.

При увеличении скорости воздушного потока наблюдался переход от слабого обрушения волн к достаточно интенсивному с образованием брызг и пенных гребней, что затрудняло определение формы поверхности оптическим методом на большей части полученной последовательности изображений. В связи с этим, для получения информации о форме поверхностного волнения использовался комбинированный метод измерения возвышения поверхности воды, в котором оптические измерения дополнялись контактными с помощью струнного волнографа, установленного на оси канала непосредственно у края лазерного ножа. Записи возвышения уровня и высокоскоростной камеры были синхронизованы. Возвышение поверхности, измеренное волнографом в одной точке у края границы съемки, использовалось для вычисления предполагаемого положения поверхности в области съемки. Уровнем поверхности в точке на кадре принималось возвышение поверхности в точке измерения волнографом в момент времени, отстающий от момента измерения на время задержки, зависящее линейно от расстояния между этими точками. Таким образом, использовалось предположение о постоянной фазовой скорости волны, что в силу малых расстояний (существенно меньших длины волны) давало достаточное соответствие с формой поверхности, полученной лазерно-оптическим методом. Итоговая форма поверхности является комбинацией данных, полученных контактными и бесконтактными способами, при этом с увеличением скорости ветра роль контактных

измерений возрастала вплоть до полного замещение оптических измерений для случая расхода воздуха $2,7 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 2).

В измерениях частота опроса волнографа (100 Гц) была значительно меньше частоты видеосъемки (1,5 – 6 кГц). В связи с этим, полученная форма поверхности, наложенная на полученные изображения, выглядит как набор горизонтальных отрезков. Их длина пропорциональна отношению частоты видеосъемки к частоте опроса волнографа. Примеры, иллюстрирующие определение формы поверхности комбинированным методом для больших скоростей, показаны на рис. 3.

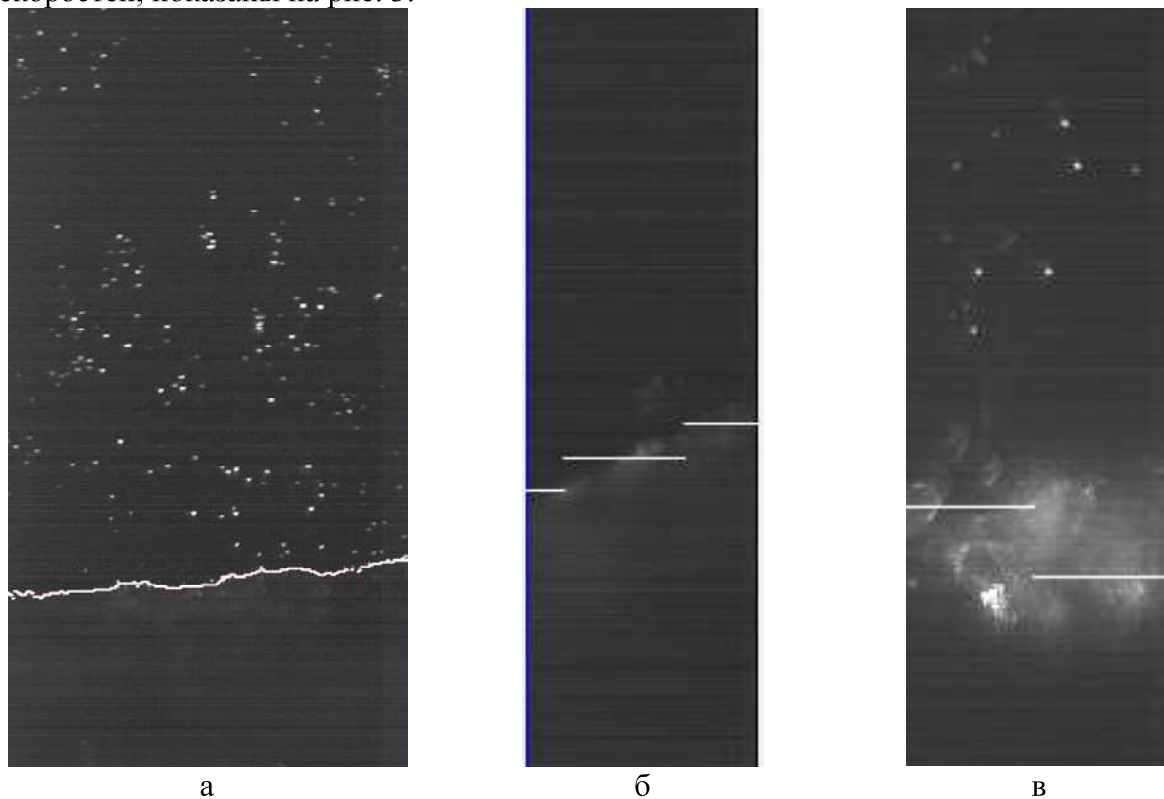


Рис. 2. Пример нахождения формы поверхности лазерно-оптическим методом (а), по данным с волнографа в случае пенного гребня (б) и заднего фронта волны (в)

Определение скорости воздушного потока методом PIV

После нахождения формы поверхности рассчитывались поля скорости кросс-корреляционным методом по криволинейной сетке учитывающей текущую форму поверхности [5]. Использовался модифицированный PIV-метод обработки, основанный на адаптивном поиске смещения максимума кросс-корреляционной функции (далее сокращенно ККФ) для прямоугольных элементов изображения для двух последовательных кадров.

Для увеличения точности алгоритма за счет уменьшения размера окна поиска обработка производилась в два этапа: на первом этапе с использованием окна размером 128×64 пикселя был найден профиль среднего горизонтального сдвига частиц для каждой скорости ветра. На втором этапе окно сравнения на втором кадре смещалось на величину сдвига, найденного на первом этапе. При этом размер окна поиска мог быть меньше итогового смещения частиц, что увеличивало пространственное разрешение метода, ускорило обработку и позволило получить больше точек. Поиск максимума ККФ производился адаптивным методом за две итерации, аналогично [5]. На первом проходе приблизительно определялось смещение по окну большего размера, затем производился допоиск с учетом вычисленного смещения для окна меньшего размера. Для увеличения точности на последнем шаге кросс-корреляции применялся алгоритм подпиксельной аппроксимации пика гауссовым двумерным профилем (см. [5]), который позволяет учитывать значения ККФ в соседних с максимумом точках.

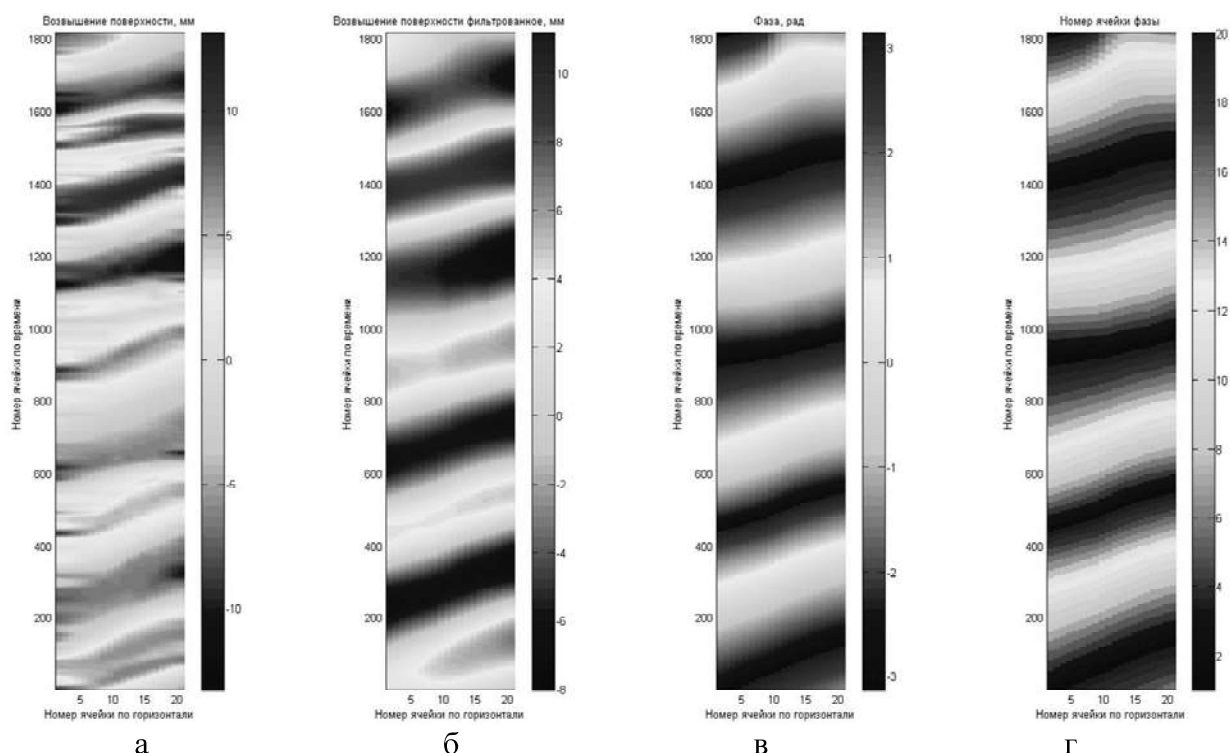


Рис. 3. Пример определения фазы волны по форме поверхности. а – исходная форма поверхности, б – результат частотной фильтрации, в – найденная с помощью преобразования Гильберта фаза, г – номер ячейки фазы

Для исключения из обработки окон с недостаточным количеством частиц, для каждого изображения с помощью оператора Собеля были найдены точки, соответствующие, высоким значениям градиента яркости. Эти точки соответствуют контурам изображений частиц на кадрах. Для каждого окна производилось вычисление количества подобных граничных пикселей. Пороговое значение градиента яркости при поиске контуров было подобрано так, что в областях без частиц не находилось граничных пикселей. Кросс-корреляция проводилась только с окнами, в которых присутствовал хотя бы один граничный пиксель. При этом, если количество граничных пикселей было значительно выше среднего, то на части изображения соответствующей этой области чаще всего присутствовали блики, брызги или пенный гребень, и вычисленное для нее смещение не учитывалось при дальнейшем усреднении. Также не учитывались области, для которых величина максимума ККФ значительно отличалась от характерного для реализации, т.к. такие области чаще всего соответствовали случаю ухода частиц из лазерного ножа за время между кадрами.

При сильных ветрах увеличивалась неоднородность засева, что приводило к значительным разрывам (отсутствию данных) во временных зависимостях скоростей при фиксированных горизонтальных координатах. Несмотря на меры по удалению брызг, оптические искажения при увеличении скорости ветра нарастали, что приводило к уменьшению точности. Все эти факторы в дальнейшем не позволили с достаточной точностью вычислить турбулентный поток импульса и определить по нему u^* , поэтому при обработке использовались только профили средней скорости.

Нахождение средних полей скорости

Для корректного вычисления средних профилей скорости использовался метод, основанный на фазировке измеряемых скоростей ветра на различных уровнях от взволнованной поверхности по схеме, использованной для исследования взаимодействия воздушного потока с волнами, генерируемыми волнопродуктором [5]. Для определения фазы волны, над которой находится точка измерения скорости, использовалось преобразование Гильберта над временными реализациями возвышения поверхности воды, которые

представлены в нескольких равноудаленных вертикальных сечениях для каждого кадра. Таких сечений на кадре было от 3 до 7 (в зависимости от ширины кадра, которая определялась скоростью съемки), при этом узлы сетки определения поля скорости расположены чаще. Для вычисления положения поверхности для каждого вертикального столбца поля скорости используется линейная интерполяция. Таким образом, для каждого столбца имеется своя зависимость положения поверхности от времени. Пример такой зависимости для всех столбцов одной реализации представлен на рис. 3.

Пространственные спектры волнения имеют ярко выраженный пик и, соответственно, нас в первую очередь интересует картина течений над основной гармоникой волны, т.е. определение фазы основной гармоники волны. Проводилась частотная фильтрация полученных вышеописанным методом временных реализаций по полосе шириной 2 Гц возле пиковой частоты, определенной для каждой скорости ветра по временным реализациям с волнографа (рис. 3, б). Такие фильтрованные реализации с убранной постоянной составляющей хорошо подходят для определения фазы волны с помощью преобразования Гильберта (рис. 3, в). С применением экономного алгоритма быстрого преобразования Фурье преобразование Гильберта позволяет определить амплитуду и фазу возвышения поверхности как функции времени.

Для получения полей скорости, осредненных по турбулентным пульсациям, проводилось условное осреднение при фиксированной фазе. При этом для уменьшения ошибок, связанных с недостаточным числом измерений, проводился биннинг полученных данных в интервалах по фазе размером 18 градусов, что дает 20 различных значений фазы (рис. 3, г).

Усреднение выполнялось двумя способами:

1) Усреднение по фиксированным горизонтам (рис. 4, а). Полученные поля скорости разбивались на горизонты с шагом 32 px (6,4 мм реальной высоты). Для каждого горизонта и каждой фазы проводилось накопление скоростей со всей реализации и затем усреднялось.

2) Усреднение по расстоянию до поверхности (рис. 4, б). Для каждого кадра в каждом столбце сетки выбиралась ячейка одного и того же номера, что в использованной криволинейной системе координат означало фиксированное расстояние от поверхности. Данные из соответствующих одинаковых ячеек по высоте и по фазе накапливались со всей реализации и затем усреднялись.

Вышеописанные методы использованы для компенсации недостатка, проявляющегося при усреднении без учета фазы волны: из-за того, что в некоторых фазах брызг было больше, а значит ячеек с корректно определенными скоростями вблизи поверхности волн меньше, то и статистический ансамбль для них в итоге оказался меньше, чем для верхней области изображений. При усреднении полей скорости вышеозначенными методами данный факт учитывался.

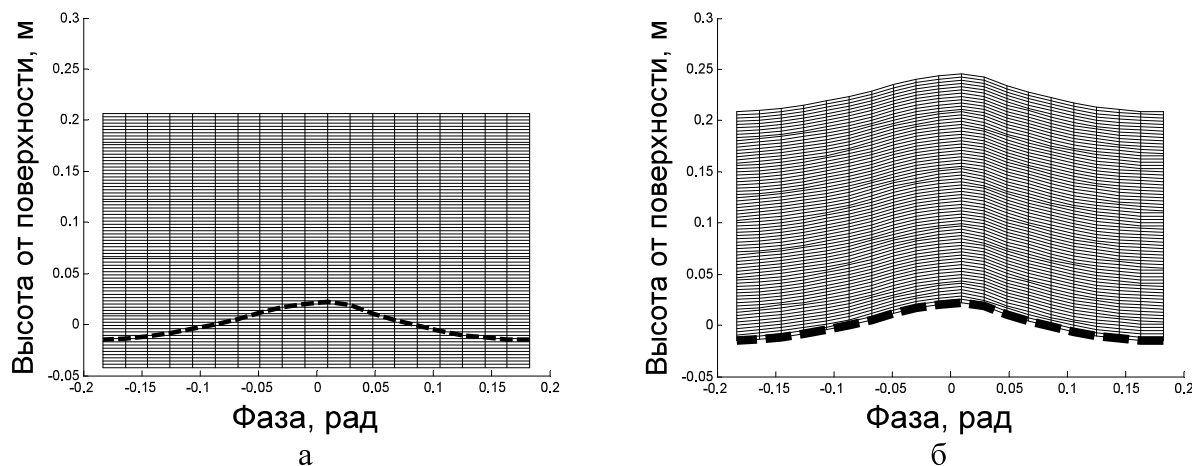


Рис. 4. Примеры сетки, по которой проводится усреднение скорости: а) усреднение по фиксированным горизонтам; б) усреднение по расстоянию до поверхности

РЕЗУЛЬТАТЫ

Средние поля скорости

Были получены картины средних полей скорости воздушного потока для обоих способов усреднения. В криволинейных координатах аналогично [5] вертикальная координата отсчитывается от положения поверхности воды в каждый момент времени. В прямоугольных координатах за 0 было принято положения среднего уровня поверхности. Горизонтальная координата представляет собой фазу волны для данной точки φ , полученную в результате условного усреднения и пересчитанную с использованием значения длины волны λ , определенной по дисперсионному соотношению для волн на глубокой воде для частоты, соответствующей пику в спектре для каждого случая скорости ветра: $x = -\frac{\varphi}{2\pi}\lambda$.

Примеры картин течения в криволинейных координатах представлены на рис. 5.

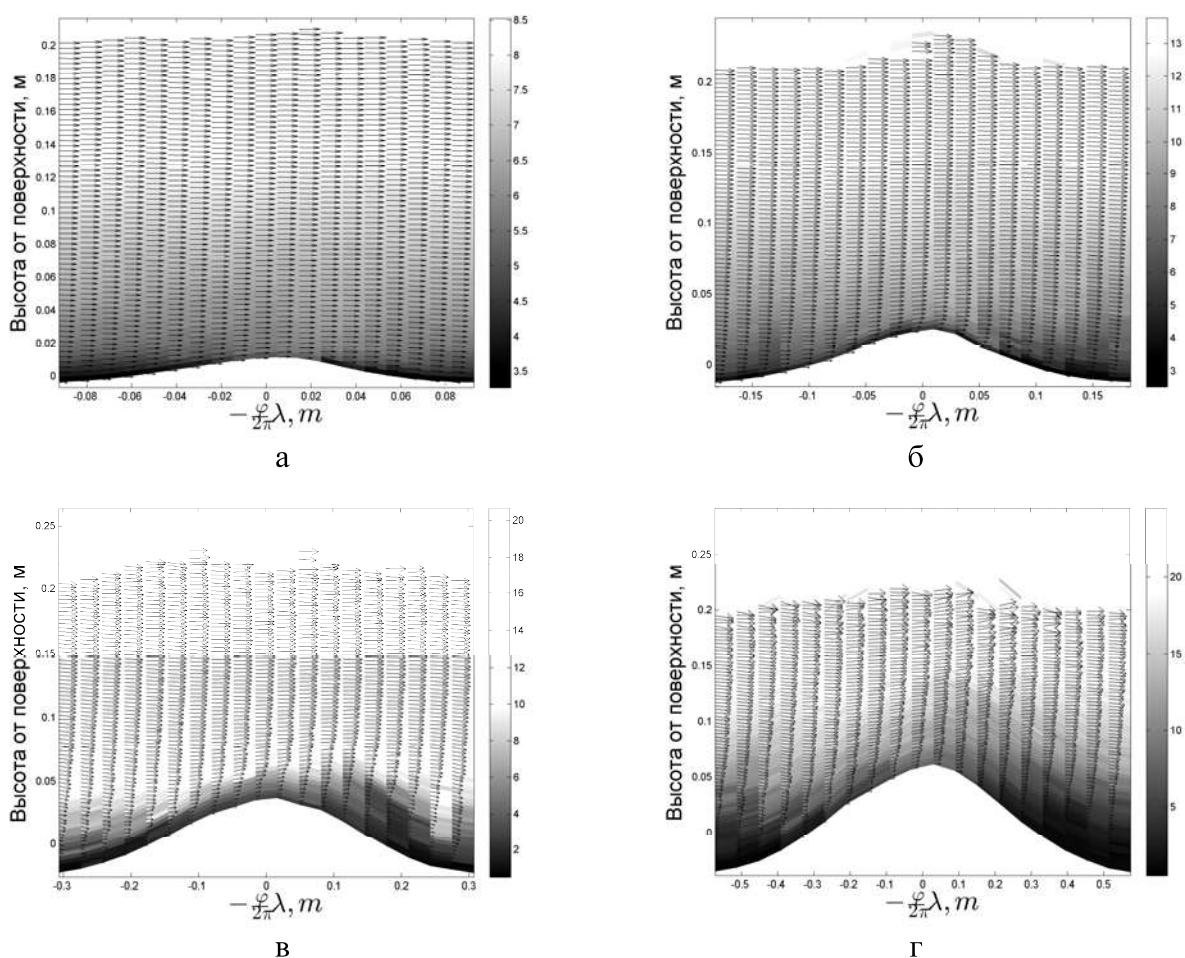


Рис. 5. Картины течений в воздушном потоке, полученные усреднением результатов PIV по высоте от поверхности для различных значений расхода воздуха: а) 1,1; б) 1,6; в) 2,2; г) 2,7 м³/с. Градации серого цвета соответствуют горизонтальной скорости ветра относительно фазовой скорости волны

Количество учитываемых точек для одного и того же удаления от поверхности в разных фазах различается. Особенно это различие заметно вблизи поверхности, где низкое количество точек усреднения с подветренной стороны горба волны (отрицательные значения фазы на рис. б) объясняется низким количеством частиц-трассеров в этой области в момент съемки, что в свою очередь является следствием экранирования ветрового потока горбом волны. Заметим, что для двух случаев высоких скоростей ветра (U_{10} 37 и 48 м/с)

наблюдается обратная картина: точек усреднения с подветренной стороны горба больше. Это может быть следствием влияния брызг, которые начинают интенсивно генерироваться при скоростях $U_{10} > 25 \text{ м/с}$. Концентрация брызг с наветренной стороны горба значительно выше, чем с подветренной, так как они в основном генерируются вблизи вершины волны и уносятся ветром. Кросскорреляционный алгоритм для ячеек в этой области показывает смещение брызг, а не частиц-трассеров, которых там относительно немного. Поскольку брызги имеют скорости ниже скорости ветра, то это приводит к ошибочному занижению скорости воздушного потока вблизи поверхности. Различное количество частиц в разных фазах обуславливает необходимость применения условного усреднения по фазе для получения корректных результатов.

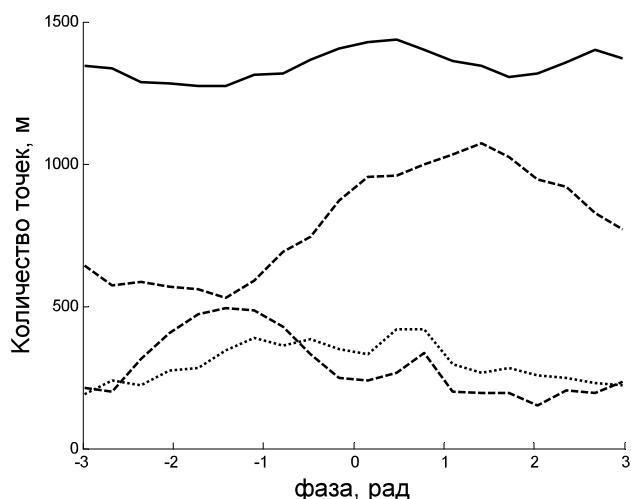


Рис. 6. Зависимость от фазы волны количества учитываемых при усреднении ячеек для различных значений расхода воздуха: а) 1,1; б) 1,6; в) 2,2; г) 2,7 м³/с, усредненная по высоте внутри приводного слоя толщиной 5 см

Профили средней скорости ветра

Усреднение полученных средних полей скорости вдоль горизонтальной координаты позволило получить вертикальные профили скорости ветра в канале (рис. 7).

Значения скоростей, полученные с использованием трубки Пито, до и после PIV-съемки во всех реализациях отличаются не более чем на 5%. Это подтверждает наше исходное предположение, что возможные незначительные изменения условий в помещении лаборатории не оказывают сколь-либо серьезного влияния на измерения. При этом значения скоростей, полученные с помощью трубки Пито, всегда оказывались ниже полученных в результате PIV измерений. Заметим, что техника PIV представляет собой прямой метод определения скорости воздушного потока, в противоположность ему трубка Пито, представляет собой косвенный метод оценки скорости потока по давлению. При этом занижение скорости потока трубкой Пито, возможно, говорит о наличии систематической ошибки.

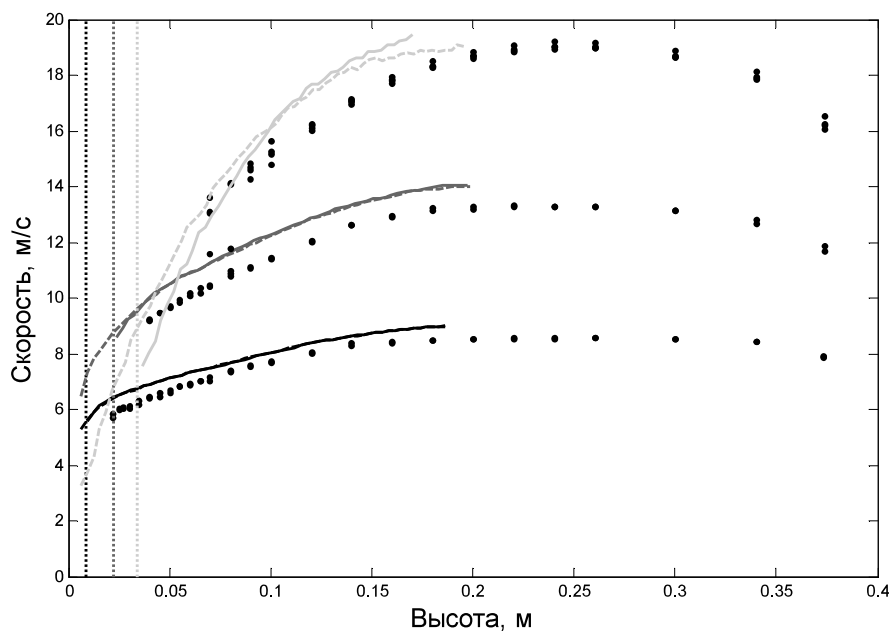


Рис. 7. Профили средней горизонтальной компоненты скорости ветра в канале для различных значений расхода воздуха: а) 1,1; б) 1,6; в) 2,2; г) 2,7 м³/с, полученные усреднением данных PIV по криволинейным координатам (сплошные линии), прямым координатам (штриховые линии) и на основе данных с трубки Пито (символы). Пунктирной линией показаны средние уровни гребней волн для каждого случая

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На Ветро-волновом канале ИПФ РАН выполнены лабораторные эксперименты по исследованию структуры воздушного турбулентного пограничного слоя над волнами при условиях, моделирующих приводный пограничный слой атмосферы при сильном и ураганном ветре. Воздушный поток в канале с квадратным сечением 0,16 м² создавался с помощью вентилятора. Расход воздуха принимал значения 1,1; 1,6; 2,2 и 2,7 м³/с, что соответствовало оцененным значениям эквивалентных скоростей ветра на стандартной высоте 10 м от 10 до 48 м/с. С использованием модифицированной техники цифровой оптической анемометрии (PIV) получены осредненные по турбулентным пульсациям поля скорости воздушного потока над поверхностью воды, искривленной волной. Подчеркнем, что подобные дистанционные методы позволяют получить поле скорости воздушного потока, в том числе ниже гребней волн, в их впадинах. Осреднением по фазе волны при фиксированных расстояниях от поверхности воды получены средние профили скорости воздушного потока в криволинейных координатах, следующих за волной. С использованием контактных измерений (трубки Пито) проведены измерения профилей скорости воздушного потока над гребнями волн в декартовых координатах. Для сравнения результатов измерений с помощью двух техник данные измерений с помощью техники PIV также выражены в декартовых координатах. На расстояниях от гребней волн более 10 мм оба экспериментальных метода давали близкие результаты.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№14-08-31740 мол_а, 14-05-31415 мол_а, 15-35-20953 мол_а_вед) и Гранта президента МК-3550.2014, проекта РНФ № 14-17-00667.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **C.W. Fairall, E.F. Bradley, J.E. Hare, A.A. Grachev, J.B. Edson** Bulk parameterization of air-sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm // J. Climate.2003.V.16. No 4. P. 571-591.
2. **M.D. Powell, P.J. Vickery, T.A.**Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones / Reinhold // Nature. 003. V.422. P.279-283.
3. **Yu. I. Troitskaya, D.A. Sergeev, A.A. Kandaurov, G.A Baidakov, M.A. Vdovin, V.I. Kazakov** Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions // JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 117, C00J21, 13 PP., 2012 doi:10.1029/2011JC007778
4. **Yuliya Troitskaya, Daniil Sergeev, Alexander Kandaurov and Vasili Kazakov.**Air-sea interaction under hurricane wind conditions in "Recent Hurricane Research - Climate, Dynamics, and Societal Impacts"// ISBN 978-953-307-238-8 Book edited by: Prof. Anthony Lupo 2011. P. 247-268.
5. **Yu. Troitskaya, D. Sergeev, O. Ermakova, G. Balandina** Statistical Parameters of the Air Turbulent Boundary Layer over Steep Water Waves Measured by the PIV Technique// J. Phys. Oceanogr. -2011. V. 41.P. 1421-1454.
6. **А.А. Кандауров, Д.А. Сергеев, Ю.И. Троицкая** Измерение характеристик поверхностного волнения методами цифровой визуализации в рамках лабораторного моделирования взаимодействия атмосферы и океана // Оптические методы исследования потоков: XI Межд. науч-технич. конференция [Электронный ресурс]: труды конференции. Электрон. дан. М.: МЭИ (ТУ), 2011. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). Доклад №90, 8 с. ISBN 978-5-9902974-1-8 № гос. регистрации 0321101669.
7. **Canny, J. A.** Computational approach to edge detection // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence.1986.V. 8(6). P. 679-698.

D. A. Sergeev¹, A.A. Kandaurov¹, M.I. Vdovin¹, G. A. Baydakov¹, Yu. I. Troitskaya¹

¹*Institute of applied physics RAS, Russia,
603950, Nizhny Novgorod, Uliyanova st, 46, E-mail: daniil@hydro.appl.sci-nnov.ru*

NUMERICAL METHODS VERIFICATION FOR FLOW AROUND OBJECTS BASED ON ITS COMPARISON WITH LABORATORY EXPERIMENTS BY USING VISUALIZATION METHODS

Laboratory investigations of the structure of the turbulent boundary layer above the waves under conditions modeling near-water boundary layer of the atmosphere for strong and hurricane winds were carried on the Wind-wave channel of IAP RAS for 10-meters equivalent wind speed from 10 up to 48 m/s. Air flow velocity fields and mean wind velocity profiles over the curved wavy surface averaged over turbulent fluctuations were obtained by using Particle Image Velocimetry (PIV) technique.

WIND, WAVES, LABORATORY MODELING, PIV