

УДК 532.528: 532.574.7: 532.582: 53.088.23

К.С. Первунин^{1,2}, А.Ю. Кравцова^{1,2}, М.В. Тимошевский^{1,2}, К. Ханъялич^{2,3}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), Россия, 630090, Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 1
Новосибирский государственный университет (НГУ), Россия,
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

²Дельфтский технологический университет (TU Delft), Факультет химического машиностроения, Нидерланды, 2628 BL, Delft, Julianalaan, 136, E-mail: pervunin@itp.nsc.ru

ВАЛИДАЦИЯ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЙ, ИЗМЕРЕННЫХ МЕТОДОМ PIV/LIF, ВБЛИЗИ КАВИТИРУЮЩЕГО ГИДРОКРЫЛА

АННОТАЦИЯ

С применением анемометрии по изображениям частиц (метод Particle Image Velocimetry – PIV) были исследованы кавитирующие течения вблизи плоской пластины с закругленной носовой частью и гидрокрыла НАСА0015 при углах атаки от 0 до 9 градусов. В работе представлена последовательность алгоритмических подходов для обработки мгновенных изображений, регистрируемых методами анемометрии по изображениям частиц. Данный класс течений представляет собой достаточно сложный объект для исследования, требующий применения современных процедур валидации данных. Благодаря использованию таких процедур удалось существенно повысить качество векторных полей скорости на конечном этапе обсчета. Проведенный анализ погрешности измерения статистических величин (средних и турбулентных характеристик) показал значительное влияние размера выборки на погрешность измеряемых величин. В результате в работе были также даны критерии для оценки допустимой погрешности разных величин. Таким образом, показано, что метод PIV позволяет измерять скорость в кавитирующих течениях, в том числе в пределах парогазовой фазы. Из анализа распределений средней скорости течения и моментов флуктуаций скорости было обнаружено, что зарождение кавитации обусловлено развитием потока несущей жидкости вблизи передней кромки гидропрофиля. Однако вниз по потоку структура течения сильно зависит от режима кавитации.

АНЕМОМЕТРИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ, КАВИТИРУЮЩИЕ ЧАСТИЦЫ, СРЕДНИЕ И ТУРБУЛЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

ВВЕДЕНИЕ

Исследование гидродинамики турбулентных дисперсных течений крайне необходимо для совершенствования и оптимизации современного гидрооборудования. Для этого в последнее время активно применяются методы численного моделирования, для развития и верификации которых требуются комплексные экспериментальные данные о пространственной структуре таких течений и распределениях турбулентных характеристик. При этом наиболее востребованными оказываются результаты исследований в канонических условиях: сопла Вентури, модельные двумерные и трехмерные гидропрофили, тела

вращения и так далее. В эксперименте получение подобных данных возможно только с использованием современных методов измерений, например, анемометрия по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry – PIV и Particle Tracking Velocimetry – PTV), основанная на стробоскопической трассерной визуализации течений и последующем измерении перемещения трассирующих частиц за малый промежуток времени. Подходы PIV и PTV позволяют измерять пространственные распределения мгновенной скорости течения, а также рассчитывать поля средних и турбулентных характеристик течений по некоторой выборке исходных данных.

Для данного класса течений одним из наиболее типичных и одновременно сложных для изучения объектов являются нестационарные кавитирующие потоки. В литературе доступно достаточно большое количество работ, в которых применялись методы анемометрии по изображениям частиц в различных конфигурациях для изучения гидродинамики таких течений [1 – 3]. Тем не менее, в перечисленных исследованиях практически не представлены результаты по турбулентной структуре кавитирующих потоков. Те немногие работы, в которых все же представлены подобные данные (например, [4]), не позволяют сделать количественных выводов о влиянии различных параметров течений на их турбулентную структуру либо в виду ограниченности статистической выборки, на основе которой осуществляется расчет турбулентных характеристик, либо в виду сильной ограниченности области измерений. Таким образом, экспериментальные работы, доступные в открытых источниках, в которых используются методы анемометрии по изображениям частиц для измерения скорости вблизи кавитационных каверн или конгломератов пузырей, не носят систематического характера, а их количество сильно ограничено.

Вместе с тем, необходимо отметить, что при исследовании двухфазных дисперсных течений частицы дисперсной фазы (пузыри, капли или твердые включения) являются источником дополнительных искажений. Одиночные частицы и/или их конгломераты при высокой концентрации, кавитационные каверны и другие формы кластеризации частиц неизбежно либо полностью перекрывают, либо значительно подавляют интенсивность излучения трассеров в некоторых областях исходных изображений. Вследствие этого на рассчитанном поле скорости появляются целые области, содержащие большое количество неверных (физически некорректных) векторов или полностью состоящие из них, наличие которых в итоге приводит к значительному ухудшению качества данных на финальной стадии расчета. Поэтому для отсева таких векторов (или даже их скоплений) необходимо применение различных процедур валидации данных. В методе PIV традиционно используются процедуры фильтрации по соотношению сигнал/шум и адаптивный медианный фильтр. Однако, как показывает практика, применение только этих двух фильтров для измерения распределений скорости в кавитирующих течениях с приемлемой точностью недостаточно.

В данной работе представлена процедура кластерной валидации векторных полей скорости, получаемых методами анемометрии по изображениям частиц, для фильтрации обособленных областей из векторов, которые не удается отсеять на предыдущих этапах обработки. На примере нестационарных кавитационных течений продемонстрирована эффективность нового подхода. Более того, в настоящей работе проведен детальный анализ погрешностей для средних и турбулентных характеристик течений в зависимости от размера эффективных выборки, который часто сильно отличается для различных областей течения. На основе проведенного анализа для различных статистических характеристик рассчитан минимально необходимый размер выборки, при котором погрешность измерений не превышает некоторого заданного порога.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на кавитационном гидродинамическом стенде Института теплофизики СО РАН, представляющем собой замкнутый гидродинамический контур. Стенд оснащен двумя центробежными насосами, ультразвуковым расходомером, а также датчиками давления и температуры (рис. 1). Экспериментальная установка имеет следующие размеры: 8,4 м в длину, 2,2 м в высоту и 1,1 м в ширину. Рабочий участок установки состоит из теплообменника, хонейкомба, конфузора, рабочего канала и диффузора. Температура рабочей жидкости поддерживается постоянной с помощью системы терморегулирования, состоящей из датчика температуры и электромагнитного клапана, приводимого в действие ПИД-регулятором. Хонейкомб имеет ячейки размером 25×25 мм длиной 500 мм. Конфузор длиной 790 мм выполнен по профилю полинома четвертого порядка; степень поджатия потока составляет 16. Рабочий канал имеет прямоугольное поперечное сечение 80×250 мм, его длина составляет 1,3 м. Боковые стенки оборудованы прозрачными окнами для проведения визуальных наблюдений. Угол раскрытия диффузора составляет 3,5° на большую сторону. Для регулирования статического давления в контуре трубы над теплообменником расположена специальная шахта. Обратный канал установки включает в себя поворотное колено на 180° радиусом 750 мм сечением 250×250 мм, прямой трубопровод диаметром 300 мм, расходомерный участок и трубопровод, обеспечивающий подвод рабочей жидкости к насосной группе. Максимальный расход жидкости достигает 1147 м³/ч, что соответствует максимальной скорости течения в пустом канале (без тела обтекания) 15,93 м/с.

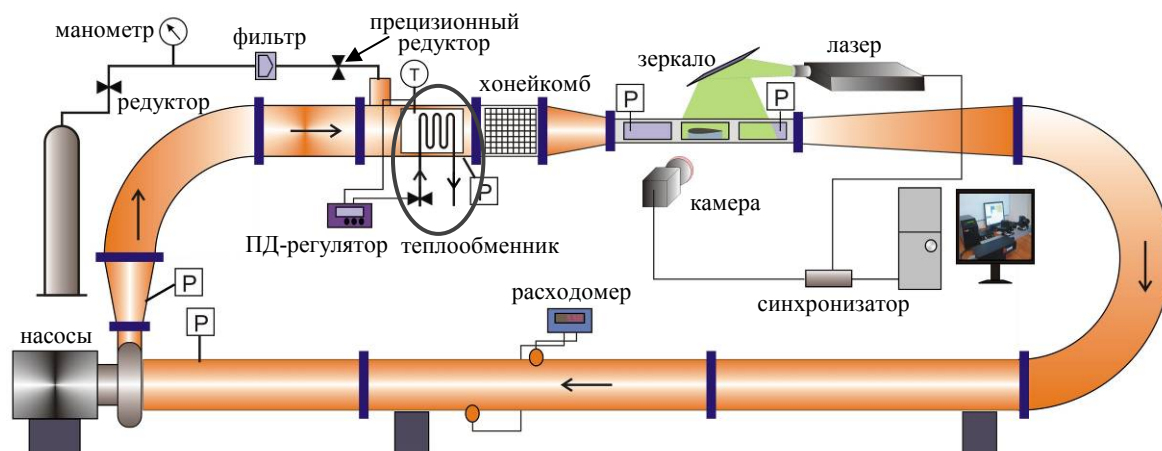


Рис. 1. Схема гидродинамического кавитационного стенда ИТ СО РАН, где P – датчик давления, T – датчик температуры

Условия эксперимента

В качестве тел обтекания в экспериментах использовались пластина с закругленной носовой частью и обрезанной под прямым углом задней кромкой (длина хорды 100 мм, толщина 15 мм) и гидрокрыло NACA0015 с длиной хорды 100 мм. Оба гидропрофиля были изготовлены из латуни с шероховатостью поверхности около 1,5 мкм. В экспериментах варьировался угол атаки α тел обтекания от 0° до 9° с шагом в 3°. Угол атаки тел измерялся с помощью оптического квадранта с точностью 30". Неопределенность выставления угла составляла около 6'.

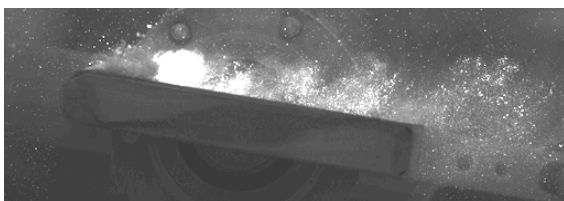
Рабочей жидкостью служила дистиллированная вода. Содержание растворенного воздуха приблизительно соответствовало расчетному значению (по закону Генри) при

нормальных условиях – 0,023 г воздуха на 1 кг воды. Температура жидкости поддерживалась постоянной и равной 30 °С с точностью $\pm 0,1$ °С. Изменение числа кавитации $\sigma = (P_{BX} - P_{ПВ})/(\rho \cdot U_0^2/2)$, где P_{BX} – статическое давление на входе в рабочий канал, $P_{ПВ}$ – давление паров воды, $U_0 = Q/(a[b - h(\alpha)])$ – среднерасходная скорость потока, Q – объемный расход жидкости, измеряемый расходомером, $a = 80$ мм и $b = 250$ мм – внутренние размеры рабочего канала, h – максимальная высота перекрытия рабочего канала гидропрофилем, зависящая от α , так что $h = 15$ мм (толщина гидропрофиля) при $\alpha = 0^\circ$ и 100 мм (длина хорды) при $\alpha = 90^\circ$. Для задания различных режимов кавитации в ходе экспериментов варьировалось динамическое давление в рабочем канале в диапазоне от $\rho \cdot U_0^2/2 = 0,5$ до 5,5. Число Рейнольдса Re , рассчитываемое по среднерасходной скорости течения в рабочем канале U_0 и хорде тел обтекания C , изменялось в пределах $0,9 \div 1,7 \cdot 10^6$. Погрешности измерений чисел кавитации и Рейнольдса были на уровне 6% и 3% соответственно.

Методы измерений

Измерение скорости течений проводилось с помощью методики PIV, интегрированной в измерительный комплекс «ПОЛИС», состоящей из двойного импульсного Nd:YAG-лазера Quantel EVG00200 (длина волны излучения 532 нм, частота повторения импульсов 15 Гц, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе 200 мДж), ПЗС-камеры (разрядность 10 бит, разрешение матрицы 2048×2048 пикселей) с оптическим низкочастотным фильтром (край полосы пропускания 560 нм) и объективом Nikon AF Nikkor 50 мм f/1.4D, а также синхронизирующего процессора. При проведении экспериментов измерительная система управлялась с компьютера посредством программного пакета «ActualFlow», описание которого приведено в [5]. Измерения производились с частотой 4 Гц. Толщина лазерного "ножа", сформированного цилиндрической линзой, составляла около 0,8 мм в измерительной области, которая совпадала с центральным продольным сечением рабочего канала вдоль большей его стороны. Расстояние от камеры до лазерного "ножа" составляло приблизительно 527 мм. Размер измерительной области был примерно 124×124 мм. Для проведения PIV измерений в поток добавлялись трассеры, покрытые флуоресцентным красителем (средний размер 10 мкм, диапазон длин волн излучения 550÷700 нм).

Использование флуоресцентных частиц для проведения PIV-измерений позволяет регистрировать их на длине волны, отличной от длины волны излучения лазера. Излучение лазера, отраженное от пузырей в камеру, оказывает негативный эффект на качество изображений частиц. Без применения оптического фильтра кавитационные пузыри создают яркие блики на изображении, в результате это делает невозможным применение PIV на "обычных" трассерах для измерения скорости жидкости в условиях кавитации (рис. 2-а.1 и 2-б.1). Использование оптического фильтра одновременно с флуоресцентными трассерами позволяет избавиться от ярких бликов на изображениях, создаваемых пузырями. В этом случае области, занятые пузырями, выглядят как размытые пятна (рис. 2-а.2 и 2-б.2). С применением жестких критериев отсева (указаны ниже) удается избавиться от "неверных" векторов, положение которых в большинстве случаев соответствует положению занятых пузырями областей. Таким образом, удается выделить сигнал от непрерывной фазы. Однако скорость пузырей остается неопределенной.



(a.1)



(б.1)

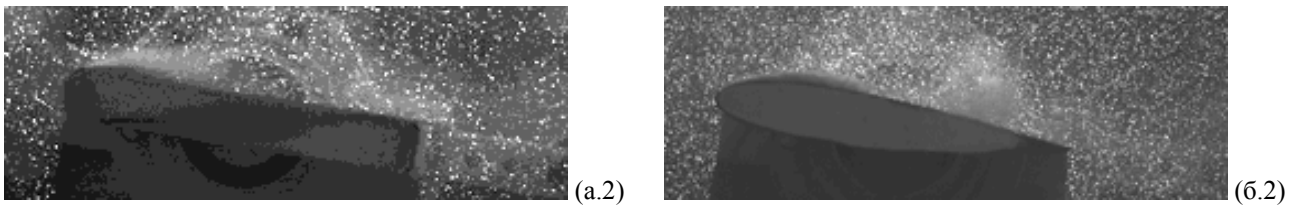


Рис. 2. Мгновенные изображения, полученные методом PIV с использованием (1) обычных и (2) флуоресцентных трассеров при обтекании (а) пластины ($\sigma = 3,5$) и (б) профиля NACA0015 ($\sigma = 2,4$). $\alpha = 9^\circ$

Для улучшения качества регистрируемых изображений перед расчетом полей скорости данные последовательно подвергались двум процедурам предварительной обработки. На первом этапе из первого и второго кадра каждого исходного изображения (рис. 3-а) вычиталось среднее по полному набору изображений поле интенсивности (рис. 3-б). Эта процедура позволяет скомпенсировать неоднородность засветки изображения независимо для первого и второго кадров, а также избавиться от бликов и теней. В результате интенсивность засветки первого и второго кадров становится примерно одинаковой, что позволяет существенно повысить точность вычисления векторов скорости на последующем этапе обработки данных. На втором этапе перед расчетом полей скорости изображения маскировались для того, чтобы избавиться от "неверных" векторов в той области изображений, которая соответствует положению гидрокрыла и теней (рис. 3-в).

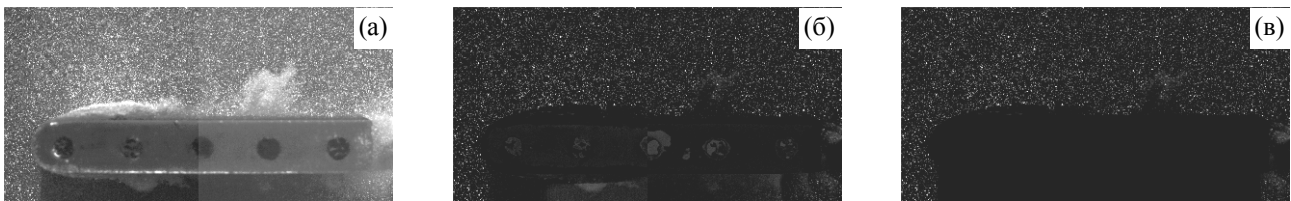


Рис. 3. Подготовка исходных изображений к расчету полей скорости: (а) исходная фотография, (б) поле интенсивности после вычета среднего по всем изображениям и (в) замаскированное поле интенсивности

Для расчета полей скорости использовался итерационный кросскорреляционный алгоритм с непрерывным смещением и деформацией элементарных расчетных ячеек и 75% перекрытием между ними (рис. 4-а). На этапе вычисления коэффициента корреляции учитывалась локальная концентрация трассеров таким образом, чтобы концентрация частиц была больше заданного порога. Пороговое значение концентрации трассеров для данного эксперимента было 5 частиц на область 32×32 пикселей. Трассеры рассматривались как свертка Гауссовой маски с радиусом в 1 пиксель и области исходного изображения 5×5 пикселей. Пороговый коэффициент корреляции был равен 0,7. Подпиксельная интерполяция кросскорреляционного пика осуществлялась по трем точкам, с использованием одномерной аппроксимации функцией Гаусса. Для того чтобы иметь сравнительно большой динамический диапазон, размер начальной расчетной области соответствовал 64×64 пикселям. Размер конечной расчетной области составлял 8×8 пикселей, чтобы обеспечить сравнительно высокое пространственное разрешение. Ошибка определения смещения не превышала 0,1 пикселя. Таким образом, погрешность измерения скорости составляла 1% и 4% при смещении трассеров на 8 и 2 пикселя соответственно. Валидация рассчитанных векторов скорости происходила в три этапа поочередно: валидация по соотношению сигнал/шум с порогом 2 (рис. 4-б), адаптивная медианная фильтрация с размером области 7×7 (Рис. 4-в) и кластерная валидация с коэффициентом 50 (Рис. 4-г).

Кластерная валидация сводится к поиску односвязных областей из векторов скорости, которые рассматриваются "верными" на текущем этапе обработки. Если в некоторой найденной односвязной области количество векторов меньше заданного порога, все векторы в этой области маркируются "ошибочными". Если же количество векторов больше заданного порога, то все векторы в текущей односвязной области сохраняют свой статус. Это делается

для того, чтобы отсеять те векторы, статус которых не может быть проверен на других шагах валидации данных. Данная процедура валидации особенно необходима в тех случаях, когда есть достаточно большая вероятность появления таких областей на изображениях, на которых количество трассеров крайне мало, и, следовательно, на рассчитанном векторном поле будут появляться области с относительно большим количеством "неверных" векторов. Это характерно, например, для дисперсных двухфазных потоков, в том числе кавитационных течений, когда происходит отрыв крупномасштабных облаков, состоящих из большого количества мелких пузырей. Внутри таких областей из "неверных" векторов могут находиться векторы, которые будут иметь статус "верных", однако таковыми не являющиеся. Другие процедуры валидации, в том числе адаптивный медианный фильтр, не позволяют отсеять такие векторы, поэтому в настоящей работе применение этого фильтра крайне необходимо. Здесь стоит отметить, что данный фильтр, конечно, может отсеивать и "верные" векторы. Однако это обстоятельство не является критичным, так как количество таких векторов в общей статистике очень мало, и, как показывает практика, это не ухудшает качество, как мгновенных полей скорости, так и статистических характеристик, рассчитываемых на конечном этапе обработки.

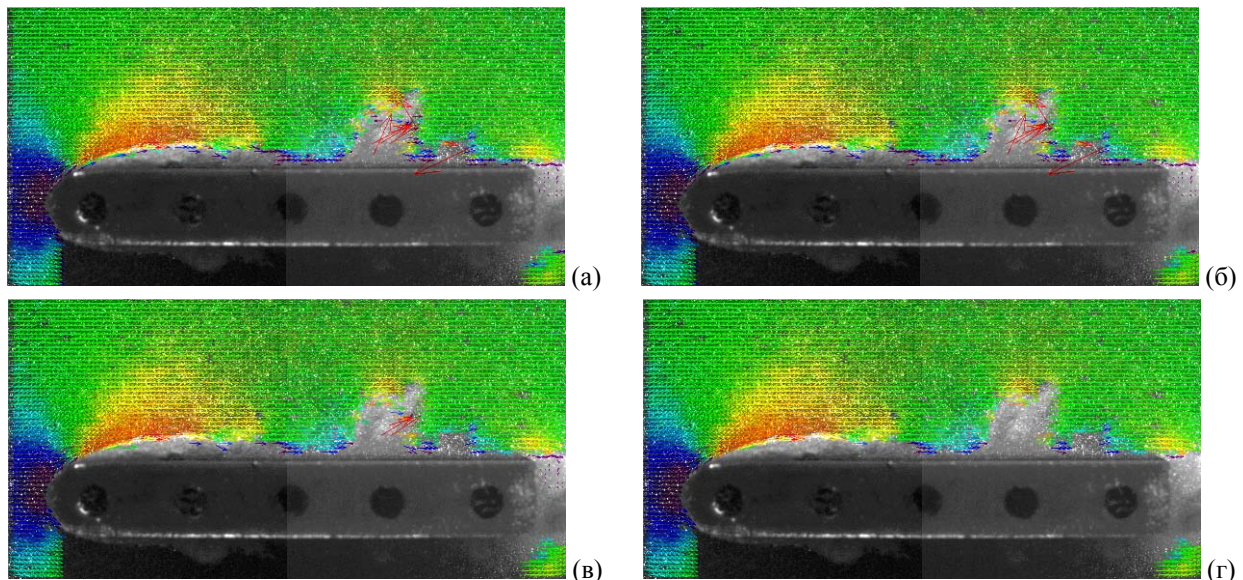


Рис. 4. Векторные поля скорости, наложенные на исходное изображение, при кавитационном обтекании пластины на режиме $\alpha = 0^\circ$, $\sigma = 1,05$ (облачная кавитация) на различных этапах валидации данных: (а) итерационный кросскорреляционный алгоритм, (б) фильтрация по соотношению сигнал/шум, (в) адаптивный медианный фильтр и (г) кластерная валидация. Показан каждый четвертый вектор

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Распределения турбулентных характеристик

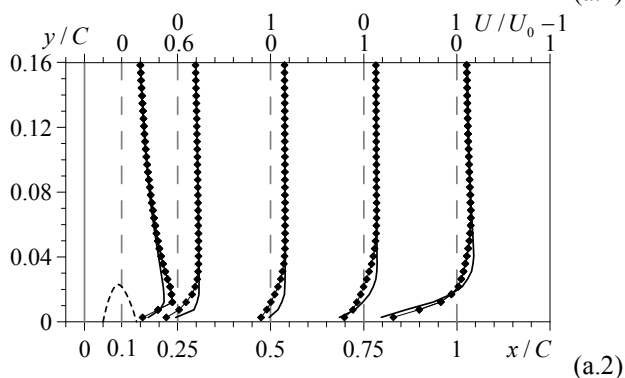
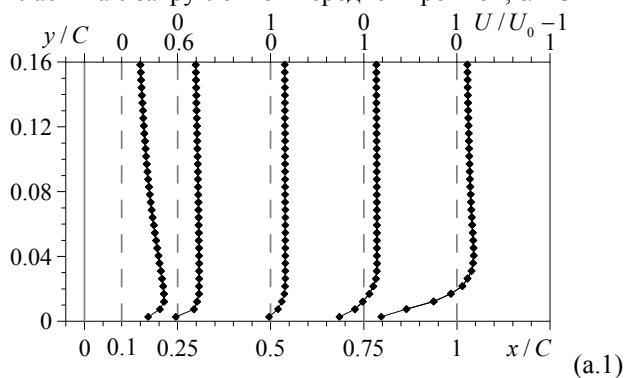
На основе измеренного ансамбля из 5000 полей мгновенной скорости были рассчитаны распределения средней скорости, кинетической энергии турбулентности, вторые и третьи статистические моменты турбулентных флуктуаций скорости со стороны разрежения обоих тел обтекания. Поскольку в экспериментах лазерной "нож" распространялся вертикально сверху вниз вдоль центрального сечения рабочего канала, область течения под гидропрофилями была затенена, и по этой причине замаскирована на графиках серым.

На рис. 5 представлены нормированные профили разности продольной компоненты средней скорости и среднерасходной скорости $(U-U_0)/U_0$ с наложенными на них изоконтурными линиями для обоих гидропрофилей на трех характерных режимах обтекания. Верхние изображения для обоих случаев (рис. 5-а.1 и 5-б.1) соответствуют докавитационному режиму

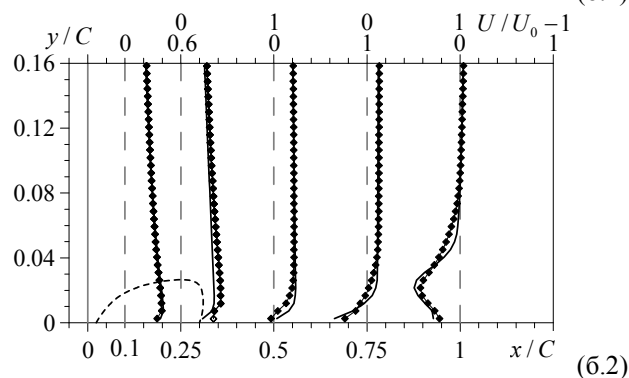
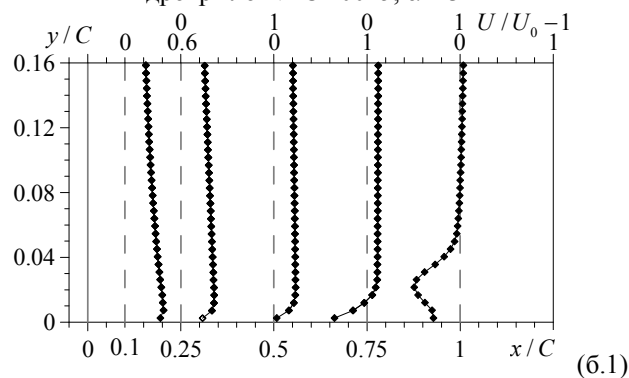
обтекания, средние (рис. 5-а.2 и 5-б.2) – стриковой или пленочной каверне и пузырьковой кавитации за передней кромкой гидропрофилей и нижние (рис. 5-а.3 и 5-б.3) – переходному и облачному режимам кавитационного обтекания.

При ненулевом угле атаки поток, приближаясь к точке стагнации, локально затормаживается перед передней кромкой обоих тел (эта область течения не представлена на графиках), а область замедленного течения смещается к стороне повышенного давления. Профили средней скорости при $x/C = 0$ практически идентичны для всех режимов. Вследствие отклонения потока и его ускорения за передней кромкой со стороны разрежения гидропрофилей, средняя скорость течения в этой области над гидрокрыльями достигает своих максимальных значений. Для пластины при начальном (максимальном) числе кавитации $\sigma = 3,02$ максимальная скорость $U_{\max}/U_0 \approx 1,63$ в точке $x/C = 0,10$ и $y/C = 0,11$, тогда как для гидрокрыла NACA0015 при начальном $\sigma = 1,42$ $U_{\max}/U_0 \approx 1,42$ в точке $x/C = 0,16$; $y/C = 0,12$. При уменьшении σ максимум скорости сначала возрастает и смещается вниз по потоку, а затем постепенно уменьшается и смещается вверх по течению. Это обстоятельство объясняется следующим образом. Как известно, уменьшение числа кавитации приводит как к переходу к другому типу кавитационного обтекания, так и для данного режима к увеличению каверны и размеров отрывающихся облаков. В случае неустойчивых режимов обтекания этот процесс сопровождается пульсациями каверны. Следовательно, пульсации каверны приводят к росту флуктуаций скорости течения (см. Рис. 6), более интенсивному перемешиванию и переносу поперечного импульса, что, как следствие, влечет за собой уменьшение значений скорости. Вниз по течению вдоль поверхности гидропрофилей значения средней скорости уменьшаются, за исключением режима для пластины с максимальным числом кавитации (рис. 5-а.1).

Пластина с закругленной передней кромкой, $\alpha = 3^\circ$



гидрокрыло NACA0015, $\alpha = 3^\circ$



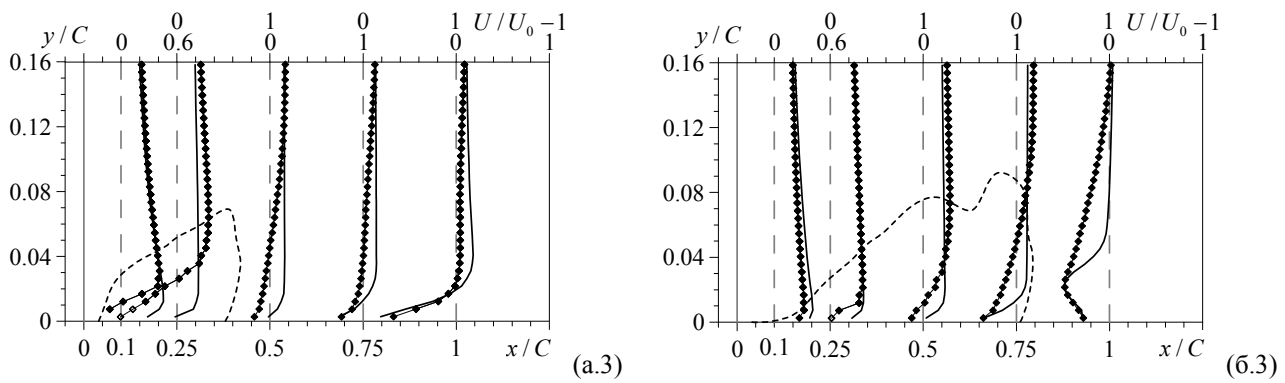
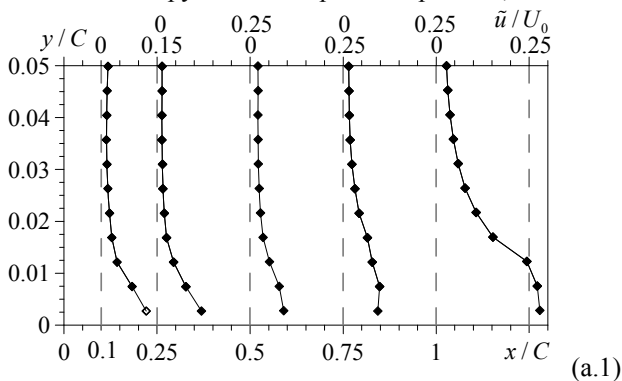


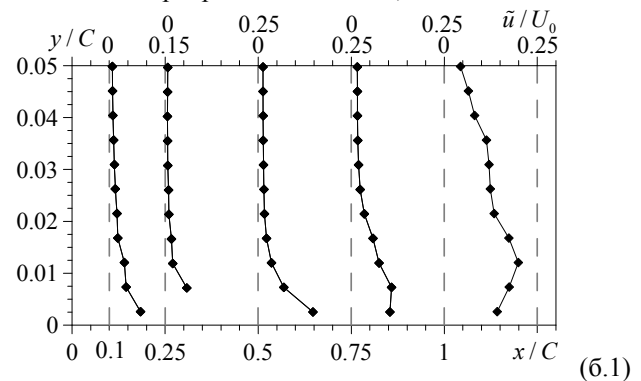
Рис. 5. Эволюция продольной компоненты средней скорости вниз по потоку для (а) пластины при $\alpha = 3^\circ$, когда (а.1) $\sigma = 3,02$ (однофазный поток), (а.2) $\sigma = 2,48, L_c/C = 0,06$ (стриковая кавитация), (а.3) $\sigma = 1,7, L_c/C = 0,23$ (переходный режим); (б) гидрокрыла NACA0015 при $\alpha = 3^\circ$, когда (б.1) $\sigma = 1,42$ (однофазный поток), (б.2) 1,14 (пузырьковая кавитация), (б.3) $\sigma = 0,93, L_c/C = 0,66$ (переходный режим). Ось абсцисс направлена вниз по потоку вдоль поверхности гидропрофиля. Заполненные и пустые символы показывают соответственно достоверные значения и значения с повышенным уровнем погрешности. Сплошные тонкие линии отображают профили для однофазного потока, представленные на графиках а.1 и б.1. Пунктирные линии показывают усредненную по времени межфазную границу присоединенной каверны. Направление потока – слева направо

Вблизи задней кромки пластины $x/C = 1,0$ можно видеть появление области, где достигается умеренный максимум скорости $1,2U_0$ вследствие исчезновения пристенного сдвига вблизи кромки, на которой происходит отрыв потока. Ни для одного из гидропрофилей не наблюдался отрыв потока за исключением задней кромки пластины. В случае переходного режима на пластине (рис. 5-а.3) поперечный размер турбулентного следа (не представлен на рисунке) существенно больше вследствие плохо обтекаемой формы тела и достигает $0,35C$ на расстоянии $1C$ от задней кромки профиля. Плохо обтекаемая форма пластины является причиной генерации крупномасштабных вихревых структур в слое смешения на границе облачной каверны. В случае гидрокрыла NACA0015 его размер составляет $0,07C$. Однако необходимо отметить, что настоящие наблюдения действительны только для усредненных величин, так как линии отрыва каверн нестационарны и пульсируют вблизи среднего положения.

Пластина с закругленной передней кромкой, $\alpha = 3^\circ$



гидрокрыло NACA0015, $\alpha = 3^\circ$



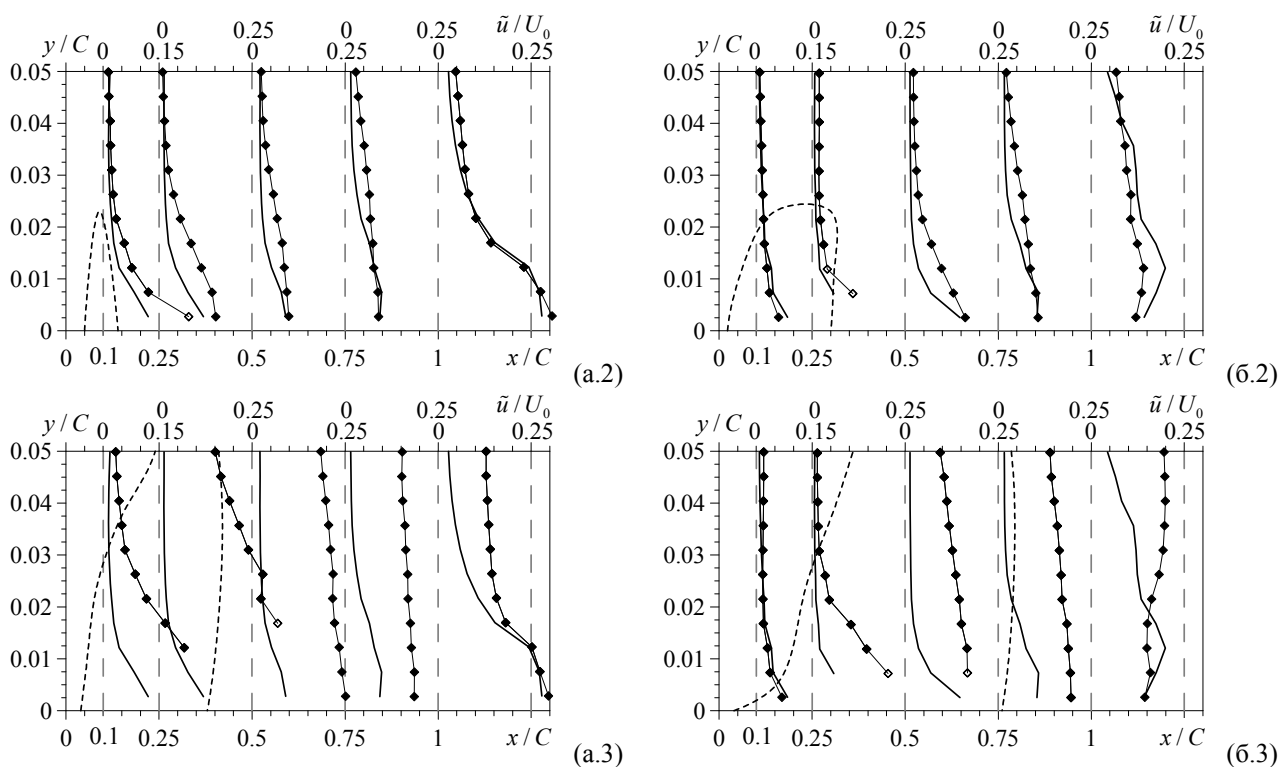


Рис. 6. Эволюция флуктуационной составляющей продольной компоненты скорости (среднеквадратичные значения) вниз по течению для (а) пластины при $\alpha = 3^\circ$, когда (а.1) $\sigma = 3,02$ (однофазный поток), (а.2) $\sigma = 2,48$, $L_c/C = 0,06$ (стриктовая кавитация), (а.3) $\sigma = 1,7$, $L_c/C = 0,23$ (переходный режим); (б) гидрокрыла NASA0015 при $\alpha = 3^\circ$, когда (б.1) $\sigma = 1,42$ (однофазный поток), (б.2) 1,14 (пузырьковая кавитация), (б.3) $\sigma = 0,93$, $L_c/C = 0,66$ (переходный режим). Ось абсцисс направлена вниз по потоку вдоль поверхности гидропрофиля. Заполненные и пустые символы показывают соответственно достоверные значения и значения с повышенным уровнем погрешности. Сплошные тонкие линии отображают профили для однофазного потока, представленные на графиках а.1 и б.1. Пунктирные линии показывают осредненную по времени межфазную границу присоединенной каверны. Направление потока – слева направо

В общем можно заключить, что поля скорости для всех трех режимов кавитационного обтекания достаточно сильно отличаются вследствие сильного влияния кавитации на несущий поток. На распределениях статистических характеристик течений, например продольной составляющей кинетической энергии турбулентности (рис. 6), можно видеть, что форма гидрокрыла и режим кавитационного обтекания являются определяющими факторами. При этом среднеквадратичные значения пульсационной компоненты продольной скорости значительно больше в случае пластины. В обоих случаях для двух режимов с большими числами кавитации, соответствующим докавитационному обтеканию и стриково-пленочной или пузырьковой кавитации, турбулентные пульсации скорости, как можно ожидать, находятся в пределах присоединенного пограничного слоя, при этом внешний поток остается невозмущенным. Однако для меньших чисел кавитации, соответствующим переходному и облачному режимам, отрыв потока и возникновение кавитационных облаков приводят к генерации интенсивных флуктуаций скорости, которые распространяются существенно дальше от поверхности гидропрофилей.

Оценка погрешности измерений

Очевидно, что точность рассчитываемых статистических моментов турбулентных флуктуаций скорости сильно зависит от размера эффективной выборки, который может сильно отличаться для различных областей течения. Векторы вблизи гидропрофиля часто отсеиваются на этапе валидации данных вследствие недостаточной концентрации трассеров, низкого отношения сигнал/шум и других причин. Этот неизбежный отсев плохих и

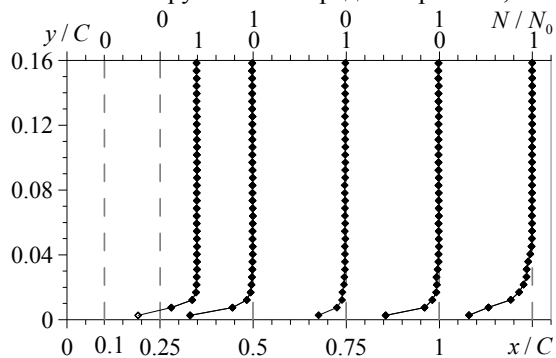
недостовверных данных требует оценки эффективной выборки для каждой элементарной расчетной ячейки и применения соответствующей коррекции.

На рис. 7 представлены профили эффективной выборки N , нормированные на $N_0 = 5000$ (количество измеренных полей скорости для каждого режима) для однофазного потока и при развитой кавитации вблизи поверхности обоих профилей. Можно видеть, что размер выборки резко падает при приближении к поверхности и становится практически равной нулю на поверхности. Для однофазного потока (рис. 7-а.1 и 7-б.1) верхняя граница этой области находится на расстоянии 2 мм от поверхности тел. Для режимов пузырьковой и стриковой кавитации (не представлены на рисунке) профили N/N_0 везде совпадают с профилями для однофазного случая, за исключением пристенной области, но даже в ней разница не превышает 10%.

Для режимов развитой кавитации (рис. 7-а.2 и 7-б.2) профили N/N_0 значительно отличаются от соответствующих распределений для однофазного случая над поверхностью гидрокрыльев. Это происходит из-за прохождения облачных каверн через эти области на исходных изображениях. Скопления пузырей перекрывают трассеры и сильно подавляют их интенсивность. Поэтому для произвольной расчетной ячейки количество трассеров время от времени становится недостаточным для корректного расчета векторов скорости. Более того, присоединенная каверна закрывает большинство трассеров, и, следовательно, эффективный размер выборки существенно уменьшается в пределах присоединенной каверны.

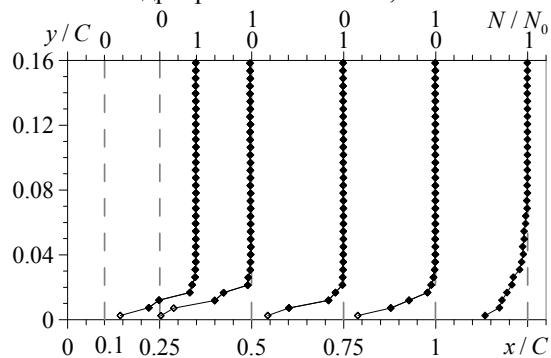
Для того чтобы оценить, как размер выборки влияет на погрешность измерений, необходимо рассчитать среднеквадратичное отклонение для каждой величины при различных размерах выборки в некотором поперечном сечении перед крылом, где поток можно рассматривать как невозмущенный. В данном случае было выбрано сечение $x/C = -1$ от $y/C = -0,8$ до $y/C = 0,8$. В этом сечении значения каждой из величин предполагаются равномерно разбросанными при постоянных средних значениях. Средние и среднеквадратичные значения были вычислены для нескольких размеров выборки N и представлены в Табл. 1. Среднеквадратичное отклонение можно рассматривать как ошибку измерений ε . Его распределение показано на рис. 8 как $\varepsilon/\varepsilon_0$, где ε_0 – базовая погрешность PIV-измерений, рассчитываемая для $N_0 = 5000$. На графике видно, что погрешность измерений возрастает с уменьшением N , но при больших N она сходится для каждой величины к определенному значению (например, ср. точки для $N = 2500$ и 5000 на рис. 8). Вместе с тем, показатель роста погрешности отличается для разных величин. Самый крутой наклон соответствует корреляции $\langle uv \rangle$, наиболее пологий, очевидно, у средней скорости.

Пластина с закругленной передней кромкой, $\alpha = 3^\circ$



(a.1)

гидрокрыло NACA0015, $\alpha = 3^\circ$



(б.1)

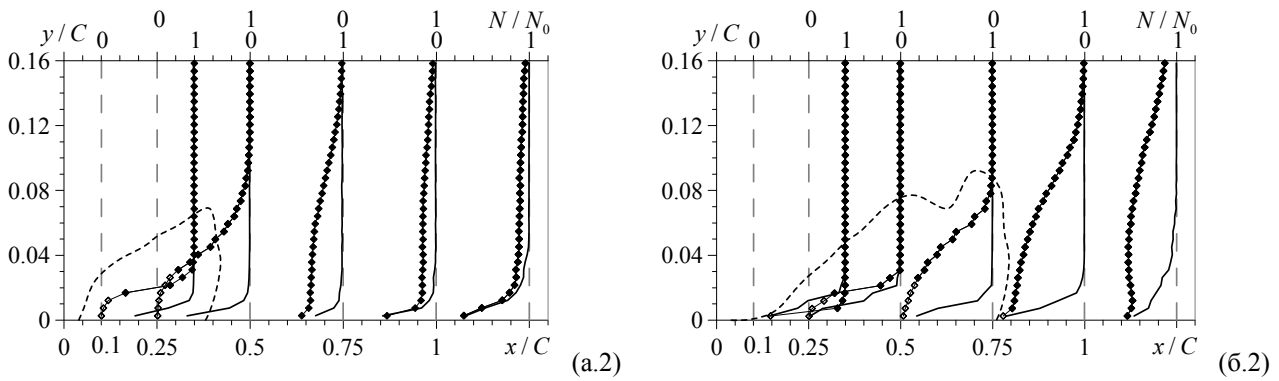


Рис. 7. Эффективный размер выборки, используемый для вычисления турбулентных характеристик течений в различных сечениях: (а) пластина при $\alpha = 3^\circ$, когда (а.1) $\sigma = 3,02$ (однофазный поток), (а.2) $\sigma = 1,7$, $L_c/C = 0,23$ (переходный режим); (б) гидрокрыло NACA0015 при $\alpha = 3^\circ$, когда (б.1) $\sigma = 1,42$ (однофазный поток), (б.2) $\sigma = 0,93$, $L_c/C = 0,66$ (переходный режим). Сплошные линии на графиках а.2 и б.2 – распределения для однофазного потока, представленные на графиках а.1 и б.2 соответственно. Пунктирные линии отображают усредненную по времени межфазную границу присоединенной каверны. Направление потока – слева направо

N	$\varepsilon^U/\varepsilon_0$	$\varepsilon^{\tilde{u}}/\varepsilon_0$	$\varepsilon^{\langle uv \rangle}/\varepsilon_0$
10	2,79	7,92	13,76
100	1,32	2,35	4,57
250	1,08	1,55	2,76
500	1,13	1,33	2,07
1000	1,05	1,18	1,47
2500	1,02	0,97	1,03
5000	1	1	1

Табл. 1. Среднеквадратичные значения ε , отнесенные к базовой погрешности ε_0 , для U , \tilde{u} и $\langle uv \rangle$ для различных размеров эффективной выборки N

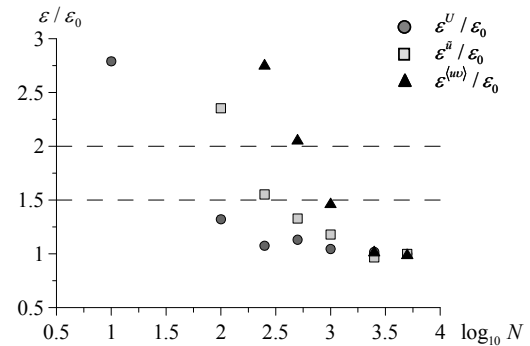


Рис. 8. Зависимость нормированной погрешности измерений $\varepsilon/\varepsilon_0$ от размера эффективной выборки N , используемой для вычисления U , \tilde{u} и $\langle uv \rangle$

В работе было произвольно задан следующий критерий для оценки допустимой погрешности. Если отношение $\varepsilon/\varepsilon_0 < 1,5$, погрешность считается вполне приемлемой. Это значит, что N должно быть больше 80, 300 и 1000 соответственно для U , \tilde{u} и $\langle uv \rangle$. Поэтому значения каждой из этих величин, которые рассчитывались на основе соответствующего размера выборки рассматриваются как достоверные и представлены заполненными символами на всех графиках рис. 5 и 6. Значения, для которых $\varepsilon/\varepsilon_0$ лежит между 1,5 и 2 (оба этих порога отображены на рис. 8 горизонтальными пунктирными линиями) расцениваются имеющими все еще удовлетворительную погрешность и показаны пустыми символами. Это условие обращается в следующий диапазон по N : $30 < N < 80$ для U , $160 < N < 300$ для \tilde{u} и $600 < N < 1000$ для $\langle uv \rangle$. Точки, для которых $\varepsilon/\varepsilon_0 > 2$, не учитывались вследствие высокого уровня погрешности и не представлены на графиках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе с применением метода PIV были измерены пространственные распределения скорости и турбулентных характеристик вблизи кавитирующих гидропрофилей на различных режимах кавитации, начиная с однофазного потока и заканчивая развитой нестационарной кавитацией. Проведен анализ визуальных данных и PIV измерений полей средней скорости и флуктуаций скорости течений вблизи плоской пластины с закругленной носовой частью и гидрокрыла NACA0015 при угле атаки 3° для нескольких чисел кавитации, соответствующим различным режимам кавитационного

обтекания. Используя современные процедуры валидации данных, включая предложенный ранее метод кластерной фильтрации, удалось существенно повысить качество рассчитываемых полей мгновенной скорости на конечном этапе обработки. Этот алгоритм валидации особенно необходим в тех случаях, когда существует относительно высокая вероятность появления таких областей на изображениях, в которых количество трассеров крайне мало, и, следовательно, на рассчитанном векторном поле будут неизбежно появляться области, содержащие большое количество "неверных" векторов. На примере нестационарных кавитационных течений продемонстрирована эффективность используемого подхода.

Пространственные распределения скорости и турбулентных флуктуаций для трех различных кавитационных режимов обтекания различны, что обусловлено сильным влиянием кавитации на поток. На развитых кавитационных режимах для обоих тел обтекания наблюдается значительное уменьшение относительных максимальных значений скорости над передней частью поверхности вследствие интенсивного перемешивания как внутри облаков, так и самими облаками, а также более раннего отрыва потока, связанного с появлением кавитации. Гидродинамический отрыв потока, обусловленный действием неблагоприятного градиента давления, и отрыв облачной каверны, возникающий вследствие ударного воздействия возвратного течения под каверной на межфазную границу, тесно связаны между собой: отрыв усиливает кавитацию и приводит к более раннему формированию облаков, что, в свою очередь, оказывает ответное действие на основной поток. Постепенный рост парогазовой каверны способствует более раннему отрыву потока посредством смещения точки отрыва вверх по потоку, а также генерации более интенсивной рециркуляции. На развитых кавитационных режимах за областью замыкания каверны наблюдается формирование интенсивного турбулентного следа, существенно увеличенного в поперечном размере, а также интенсификации турбулентных флуктуаций скорости вследствие сильного сдвига по краям облаков и формированием крупномасштабных вихревых структур вокруг паровой каверны. Таким образом, переход к развитым кавитационным режимам обтекания приводит к глобальному изменению турбулентной структуры течения по сравнению с однофазным обтеканием.

Проведенный анализ погрешностей для средних и турбулентных характеристик течений показал, что в докавитационном случае размер эффективной выборки резко падает при приближении к поверхности гидропрофиля и становится практически равным нулю на поверхности. Для режимов развитой кавитации размер выборки над поверхностью гидрокрыльев сильно сокращается по сравнению с однофазным течением. Это происходит из-за прохождения облачных каверн через эти области на исходных изображениях. Более того, наличие присоединенной каверны приводит к тому, что видимая концентрация трассеров в ее границах сильно снижается, и, следовательно, эффективный размер выборки также уменьшается. В работе также показано, что погрешность измерений возрастает с уменьшением эффективной выборки, но, когда выборка становится достаточно большой, погрешность сходится для каждой величины к определенному значению. Однако показатель роста погрешности отличается для разных величин. Самый крутой наклон соответствует корреляции напряжением Рейнольдса, а наиболее пологий, очевидно, у средней скорости. На основе проведенного анализа для различных статистических характеристик рассчитан минимально необходимый размер выборки, при котором погрешность измерений не превышает некоторого заданного порога.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана РФФИ (гранты №№ 13-08-01411-а и 14-08-31590-мол_а) и грантом Президента РФ НШ-5984.2014.8 (руководитель – чл.-корр. РАН Маркович Д.М.).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

a, b – внутренние размеры рабочего канала, м
 C – длина главной хорды гидропрофиля, м
 h – максимальная высота перекрытия рабочего канала гидропрофилем, м
 L_C – длина присоединенной каверны, м
 N – размер эффективной выборки, шт.
 N_0 – размер исходной (максимальной) выборки, шт.
 P_{BX} – статическое давление на входе в рабочий канал, Па
 $P_{ПВ}$ – давление паров воды, Па
 Q – полный расход жидкости по контуру трубы, м³/с
 Re – число Рейнольдса
 U – продольная компонента средней скорости течения, м/с
 U_0 – среднерасходная скорость течения, м/с
 U_{max} – максимальное значение средней скорости, м/с
 u, v – флуктуационная составляющая продольной и поперечной компонент мгновенной скорости, м/с
 \tilde{y} – флуктуационная составляющая продольной компоненты скорости (среднеквадратичные значения), м/с
 x, y – продольная (по потоку) и поперечная координаты, м

Греческие символы:

α – угол атаки гидропрофиля, °
 ε – статистическая ошибка измерений некоторой величины (среднеквадратичные значения)
 ε_0 – базовая ошибка измерения метода PIV
 ρ – плотность жидкости, кг/м³
 σ – число кавитации

Сокращения:

PIV – Particle Image Velocimetry
PTV – Particle Tracking Velocimetry

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Foeth E.J., van Doorne C.W.H., van Terwisga T., Wieneke B.** Time resolved PIV and flow visualization of 3D sheet cavitation // *Experiments in Fluids*. 2006. V. 40. pp. 503-513.
2. **Gopalan Sh., Katz J., Liu H.L.** Effect of gap size on tip leakage cavitation inception, associated noise and flow structure // *Journal of Fluids Engineering*. 2002. V. 124. pp. 994-1004.
3. **Laberteaux K.R., Ceccio S.L.** Partial cavity flows. Part 1. Cavities forming on models without spanwise variation // *Journal of Fluid Mechanics*. 2001. V. 431. pp. 1-41.
4. **Cierpka Ch., Weier T., Gerbeth G.** Synchronized force and particle image velocimetry measurements on a NACA 0015 in poststall under control of time periodic electromagnetic forcing // *Physics of Fluids*. 2010. V. 22. p. 14.
5. **Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М., Токарев М.П., Тюрюшкин А.Н.** Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // *Вычислительные методы и программирование*. 2006. Т. 7, С. 79-85.

K.S. Pervunin^{1,2}, A.Yu. Kravtsova^{1,2}, M.V. Timoshevskiy^{1,2}, K. Hanjalić^{2,3}

*Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IT SB RAS), Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrentyev Ave., 1
Novosibirsk State University (NSU), Russia,
630090, Novosibirsk, Pirogov Str., 2
Delft University of Technology (TU Delft), Department of Chemical Engineering,
the Netherlands, 2628 BL, Delft, Julianalaan, 136
E-mail: pervunin@itp.nsc.ru*

VALIDATION AND ERROR ESTIMATION OF VELOCITY CHARACTERISTICS MEASURED BY PIV/LIF APPROACH IN A FLOW AROUND A CAVITATING HYDROFOIL

Cavitating flows around a flat plate with rounded nose and a NACA0015 hydrofoil are investigated at different attack angles from 0 to 9 degrees by means of a PIV technique. A series of algorithmic approaches is given in the paper to process instantaneous PIV images. This type of flows is a sufficiently complex object to study that requires to apply sophisticated procedures of data validation. Utilizing such procedures allowed us to enhance substantially the quality of vector fields at the final step of processing. Performed analysis of measurement uncertainty of statistical quantities (the mean and turbulence characteristics) demonstrated a significant influence of the sample range on the uncertainty of measurement quantities. As a result, criteria for estimating an acceptable uncertainty of various quantities are also given in the paper. Thus, the PIV method was shown to be capable to measure velocity fields in cavitating flow, including the regions occupied by gas-vapor cavities. Analyzing distributions of the mean velocity and statistical moments of velocity fluctuations, it was revealed that the cavitation onset is caused by flow development of the carrier liquid near the foil leading edge. However, downstream the flow structure strongly depends on the cavitation pattern.

PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY, CAVITATING PARTICLES, MEAN AND TURBULENCE CHARACTERISTICS