

УДК 532.528:532.574.7:532.582

А.Ю. Кравцова¹, Д.М. Маркович^{1,2}, К.С. Первунин¹, М.В. Тимошевский^{1,2}

¹ Институт теплофизики СО РАН, Россия, 630090, Новосибирск, пр-т. ак. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, E-mail: dmark@itp.nsc.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ PIV/LIF ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ КАВИТАЦИОННОГО ОБТЕКАНИЯ ДВУМЕРНОГО ПРОФИЛЯ

Работа посвящена применению методики PIV на флуоресцентных трассерах для исследования турбулентной структуры нестационарного кавитационного обтекания двумерных объектов: тела необтекаемой формы – плоскопараллельной пластины с закругленным передним торцом и гидропрофиля серии НАСА0015. В результате были измерены пространственные распределения мгновенной скорости и мгновенной завихренности течений, а также рассчитаны пространственные распределения средней скорости и всех пульсационных характеристик до третьего порядка включительно, а также проведено сравнение полей этих характеристик для обоих тел. Кроме того, в работе представлены данные визуализации кавитационных каверн, которые позволяют качественно изучить их динамику и пространственную структуру. В работе показано, что процесс кавитации при обтекании модельного объекта существенно изменяет всю картину обтекания.

КАВИТАЦИОННОЕ ОБТЕКАНИЕ, КАВИТАЦИОННАЯ КАВЕРНА, ТУРБУЛЕНТНАЯ СТРУКТУРА, НАСА0015, PIV/LIF, СКОРОСТНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими условиями безопасной и эффективной работы гидроэнергетических систем, как вновь создаваемых, так и уже эксплуатирующихся, являются надежность и долговечность используемого оборудования. Как правило, работа реальных энергетических агрегатов, таких как гидротурбины, сопровождается наличием нестационарного турбулентного течения сложной геометрии, зачастую являющегося двухфазным. Повышение ресурса работы, увеличение КПД гидромашин, а главное – степени их безопасности, невозможно без изучения физических механизмов гидродинамических процессов, наиболее существенную роль, среди которых играют крупномасштабные вихревые структуры и кавитация. Как известно, проблемы, связанные с кавитацией и кавитационной эрозией, принадлежат к наиболее трудным фундаментальным задачам современной гидродинамики. Таким образом, становится очевидным, что исследование динамики нестационарных вихревых структур в турбулентных течениях, возникающих в элементах гидротурбин, и их взаимодействия с парогазовой фазой является актуальной задачей.

Использование современных оптических методов диагностики двухфазных течений, таких как PIV (Particle Image Velocimetry), PTV (Particle Tracking Velocimetry), PFBI (Planar Fluorescence for Bubble Imaging) и других, несомненно, является весьма перспективным. Это связано с тем, что использование этих подходов позволяет получить принципиально новую информацию о двухфазных турбулентных потоках, а именно поля мгновенной скорости и завихренности, средней скорости, а также все турбулентные характеристики течений до третьего порядка включительно и многие другие величины. Использование комбинации

таких подходов, как например в [2], позволяет одновременно измерять характеристики обеих фаз и рассчитывать совместные корреляции пульсаций скорости фаз и локального содержания частиц дисперсной фазы. Эта информация является крайне востребованной для более глубокого понимания закономерностей процессов, происходящих в квитирующих течениях, и для развития современных методов численного моделирования двухфазных течений при больших числах Рейнольдса.

Несмотря на большое количество работ, представленных в литературе, по изучению кавитации до сих пор детальная количественная информация, необходимая для оптимизации существующих математических моделей турбулентных кавитирующих течений, крайне ограничена даже для упрощенных условий. Основные результаты представляют собой визуальные наблюдения, построенные режимные карты с качественным описанием возникающих кавитационных режимов, распределения давления. В единичных случаях представлены данные по измерению распределений скорости потока.

Методика PIV начала интенсивно применяться к кавитирующим течениям с конца прошлого века. Так, в работе [11] была продемонстрирована возможность применения метода PIV в стандартной конфигурации для исследования гидродинамики кавитирующих течений на микромасштабе вблизи поверхности модельного тела обтекания. Также метод PIV был использован для изучения течения около границ отдельных кавитационных пузырей и возле зарождающихся кавитационных каверн. В данной работе было показано, что трассирующие частицы, добавляемые в рабочую жидкость для метода PIV, можно подбирать таким образом, чтобы они не являлись активными центрами образования кавитационных пузырей. Goralan и Katz [9] детально исследовали гидродинамическую структуру течения в области замыкания кавитационной каверны и ниже по течению с помощью методики PIV. В работе показан эффект небольшого изменения числа кавитации за счет изменения температуры рабочей жидкости на мгновенную и среднюю структуру течений, а также генерацию турбулентности. При этом в статье представлены пространственные распределения содержания непрерывной фазы в потоке, осредненных по фазе средней скорости, напряжений Рейнольдса и кинетической энергии турбулентности. Полученные результаты использованы для расчета членов уравнений баланса массы и импульса вниз по течению от кавитационной каверны. Однако статистика, по которой осуществлялись эти вычисления, представляется слишком малой (фазовое осреднение проводилось только лишь по 72 изображениям). Одной из наиболее важных работ по экспериментальному исследованию течений вблизи кавитационных каверн, безусловно, является статья [10], в которой авторы представили широкую классификацию типов кавитационного обтекания. Кроме того, посредством метода PIV было проведено детальное изучение кавитационных каверн, образующихся за передним краем гидрокрыла. В результате были сделаны следующие значимые выводы. Течение в следе за открытой каверной (open cavity) подобно турбулентному сдвиговому течению за уступом. При этом в PIV экспериментах возвратная струя (re-entrant jet) в области замыкания открытой каверны не была обнаружена, хотя рециркуляционное течение, соответствующее области отрыва потока, было зафиксировано для некоторых случаев. Поверхность раздела нестационарной закрытой каверны (closed cavity) изгибается, формируя возвратную струю за задним краем каверны; возвратная струя направлена против течения вдоль поверхности профиля. В результате при достижении определенных условий возвратное течение ударяет в границу каверны вблизи лобовой точки профиля и приводит к периодическому образованию облачных каверн (cloud cavity). В этой работе авторы приводят осредненные по фазе (при выборке из 50 полей мгновенной скорости и завихренности) поля скорости и завихренности для различных фаз образования и развития облачной каверны. Данная статистика, конечно, является слишком малой для количественной оценки результатов, поэтому авторы приводят лишь качественный анализ. В работе [8] авторы использовали метод PIV с высоким пространственным разрешением для исследования течения вблизи кромки трехмерного модельного гидропрофиля, а также вдоль тонкого концевых вихря (tip vortex), срывающегося с края профиля, в центре которого

можно было наблюдать зарождение кавитационных полостей (vortex cavitation). В результате анализа полей мгновенной скорости были получены функции плотности вероятности циркуляции концевой вихря. В работе [7] метод PIV с высоким временным разрешением был применен для изучения динамики течения жидкости вблизи развитой пленочной кавитационной каверны (fully developed sheet cavity), возникающей за двумерным и трехмерным телами обтекания, а также вокруг отрывающихся кавитационных каверн при кавитации облачного типа. В качестве трассеров были использованы флуоресцентные частицы в комбинации с оптическим фильтром для того, чтобы избавиться от бликов, создаваемых кавитационными пузырями на матрице камеры. Кроме того, авторы работы разработали и использовали адаптивную маску для того, чтобы исключить из расчетов полей скорости те области изображения, которые заняты паровой каверной. Применение методики PIV в стерео конфигурации подробно описано в статье [5], посвященной исследованию влияния вихревого жгута на динамику и шумовое излучение кавитационных пузырей, зарождающихся в сопле Вентури. В работе [3] методика PIV была использована для визуализации процесса отрыва кавитационных каверн в режиме облачной кавитации (cloud cavity shedding process), а также для идентификации характерных этапов развития кавитационной каверны для течения в сопле Вентури с уступами различной высоты. Помимо большого количества перечисленных работ, также стоит упомянуть две последние [6] и [4], в которых исследовалось влияние внешнего периодического поля сил Лоренца, действующих вдоль размаха гидрокрыла, на отрыв потока в слабо проводящей жидкости. Переменное поле сил Лоренца создавалось за счет линейки из электродов и постоянных магнитов, встроенной в поверхность гидропрофиля. В результате применение метода PIV позволило рассчитать линии тока и пространственные распределения мгновенной скорости, завихренности и напряжений Рейнольдса. В работе [4] для исследования турбулентной структуры течений был дополнительно применен вейвлет-анализ. Однако в этих двух работах измерения были ограничены небольшой областью вокруг профиля.

В перечисленных исследованиях практически отсутствуют экспериментальные данные по турбулентной структуре кавитирующих потоков. Те немногие работы, в которых представлены такие данные, не позволяют сделать количественных выводов о турбулентной структуре течений либо в виду ограниченности статистической выборки, на основе которой осуществляется расчет турбулентных характеристик, либо в виду сильной ограниченности области измерений. Таким образом, на сегодняшний день в литературе ощущается существенный недостаток комплексных экспериментальных данных, необходимых для оптимизации существующих математических моделей расчета кавитационных процессов. С точки зрения построения и верификации математических моделей, описывающих возникновение, развитие кавитации, основной интерес представляет исследование процессов в канонических геометрических условиях (сопла Вентури, модельные профили, например крылья серий НАСА, и т.п.). Получение систематической экспериментальной информации для различных кавитационных режимов является крайне важной задачей.

Поэтому целью данной работы является применение методики PIV для исследования турбулентной структуры кавитирующих потоков в большой области вокруг профиля и в его турбулентном следе, а также изучение пространственной структуры и динамики кавитационных каверн, возникающих на модельных объектах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводились на замкнутом гидродинамическом стенде, оснащенном двумя центробежными насосами, ультразвуковым расходомером, датчиками давления для контроля среднего статического давления и датчиками температуры (Рис. 1). Габаритные размеры кавитационной трубы: длина – 8,4 м, высота – 2,2 м, ширина – 1,1 м. Рабочая часть экспериментальной установки состоит из теплообменника, в состав которого входит система змеевиков с теплоносителем и система терморегулирования, специальной шахты, которая расположена над теплообменником, для регулирования статического давления в контуре

трубы, хоннейкомба длиной 500 мм с ячейками 25×25 мм, конфузора длиной 790 мм, выполненного по профилю полинома четвертой степени со степенью поджатия 16, и рабочего участка, представляющего собой канал прямоугольного поперечного сечения 80×250 мм длиной 1,3 м с плоскими параллельными боковыми прозрачными стенками. Температура рабочей жидкости в контуре установки поддерживается постоянной с помощью системы терморегулирования, состоящей из датчика температуры и электромагнитного клапана, управляемого посредством ПД-регулятора. Рабочий канал оснащен смотровыми окнами для проведения оптических измерений. За рабочим каналом расположен диффузор с углом раскрытия 3,5° на меньшую сторону и параллельными стенками на большую сторону. Обратный канал выполнен из поворотного колена на 180 градусов радиусом 750 мм сечения 250×250 мм, прямого трубопровода диаметром 300 мм, расходомерного участка и трубопровода, обеспечивающего подвод жидкости к насосной группе. Максимальный суммарный расход жидкости по контуру составляет 1100 м³/ч, что соответствует максимальной среднерасходной скорости для рабочего канала с поперечным сечением 80×250 мм – 15,3 м/с. Скорость потока регулируется путем изменения частоты вращения крыльчатки насосов посредством преобразователей частоты.

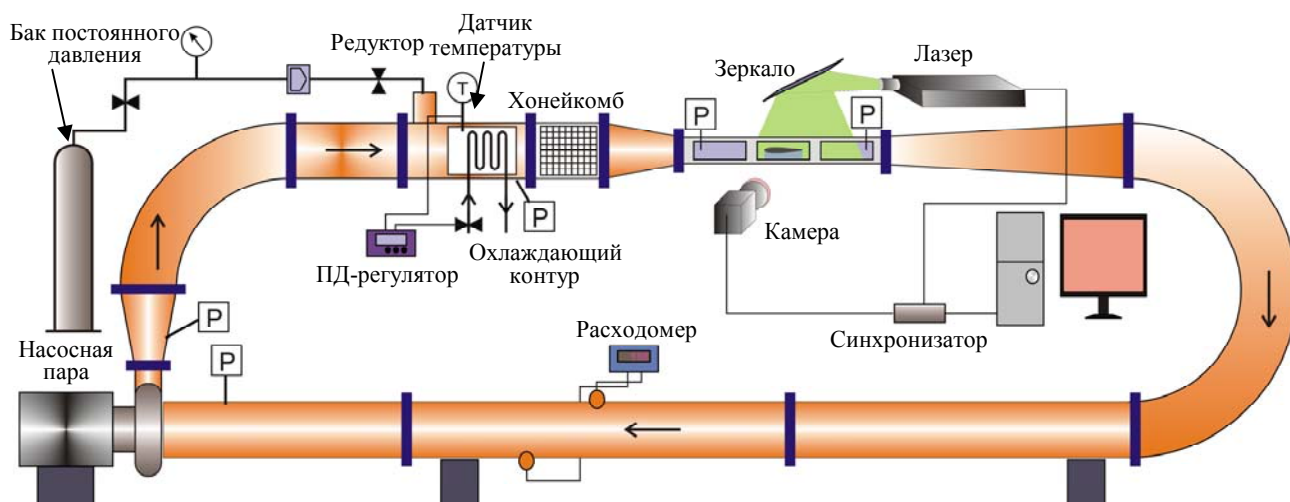


Рис. 1. Схема гидродинамического стенда

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В ходе экспериментов была проведена визуализация кавитационных каверн и измерены поля скорости жидкости как для кавитационных режимов, так и для докавитационных, вблизи плоскопараллельной пластины с закругленным передним торцом (длина – 100 мм, ширина – 15 мм) и гидрокрыла НАСА0015 с длиной хорды 100 мм (Рис. 2). Тела обтекания были изготовлены из латуни. В ходе экспериментов варьировались среднерасходная скорость набегающего потока U_0 , угол атаки тел обтекания α и статическое давление P , температура жидкости в контуре трубы составляла 23 °С. Рабочей жидкостью служила деаэрированная дистиллированная вода. Число Рейнольдса Re , рассчитанное по среднерасходной скорости течения в рабочем канале U_0 и хорде тел обтекания L (одинаковой для профиля НАСА0015 и пластинки и равной 100 мм), было примерно $0,97 \times 10^6$ для $U_0 = 8,7$ м/с и $1,2 \times 10^6$ для $U_0 = 10,7$ м/с. Число кавитации $\sigma = 2 \cdot (P_\infty - P_{нап}) / \rho U_0^2$, определяемое разницей статического давления на бесконечности и давления насыщенных паров воды, отнесенной к полному динамическому напору потока, составляло 3,5 при $U_0 = 8,7$ м/с и 2,4 при $U_0 = 10,7$ м/с. $P_{нап} = 0,023$ атм при нормальных внешних условиях. P_∞ определяется как значение статического давления на стенке пустого рабочего канала (т.е. в отсутствии тела обтекания) в месте крепления профиля при заданной скорости потока. Число Струхала

$Sh = f \cdot C / U_0$, определяемое отношением произведения длины каверны C на характерную частоту отрыва кавитационных каверн f к среднерасходной скорости течения U_0 , было равно 0 и 0,35 для $U_0 = 8,7$ м/с и $U_0 = 10,7$ м/с, соответственно. Погрешность определения числа Рейнольдса составляет 1,5%, числа Струхала – 2% и числа кавитации – 3%.

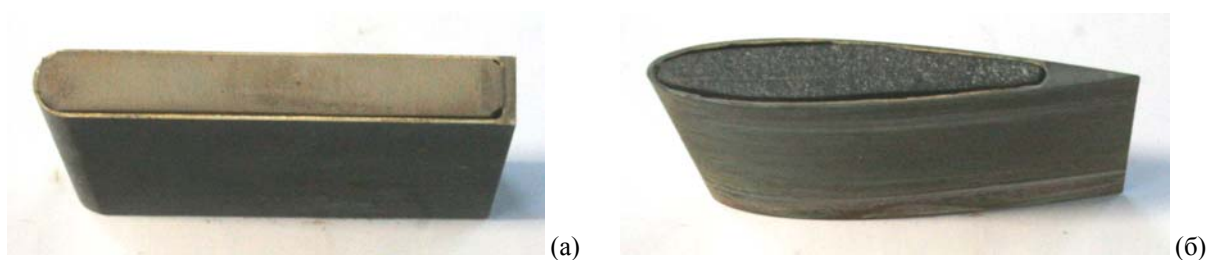


Рис. 2. Фотографии (а) плоскопараллельной пластины с закругленным передним торцом и (б) профилированного крыла NACA0015, использованных в экспериментах

Для проведения PIV-измерений использовался измерительный комплекс «ПОЛИС», состоящий из двойного импульсного Nd:YAG-лазера (длина волны излучения 532 нм, длительность импульса 5 нс, энергия в импульсе 50 мДж), ПЗС-камеры (глубина цвета 10 бит, разрешение матрицы 2048×2048 пикселей) с оптическим фильтром (нижний край полосы пропускания 560 нм) и объективом AF Micro Nikkor 60 мм f/2.8D, а также синхронизирующего процессора. При проведении экспериментов измерительная система управлялась с компьютера посредством программного пакета «ActualFlow». Толщина лазерного "ножа", сформированного цилиндрической линзой для освещения трассерных частиц, составляла около 0,8 мм в измерительной плоскости. Сечение, в котором проводились измерения, было расположено посередине канала вдоль большей его стороны. Расстояние от камеры до лазерного "ножа" составляло около 700 мм. Размер измерительной области был примерно 150×112 мм. Для проведения PIV-измерений в поток добавлялись трассеры, покрытые флуоресцентным красителем (средний размер 20 мкм, диапазон длин волн излучения 550÷700 нм).

Для расчета полей скорости использовался итерационный кросскорреляционный алгоритм с нецелым смещением областей и 50% перекрытием между ними [1]. Подпиксельная интерполяция кросскорреляционного пика осуществлялась по трем точкам, используя одномерную аппроксимацию функцией Гаусса. Для того чтобы иметь сравнительно большой динамический диапазон размер начальной расчетной области соответствовал 64×64 пикселям. Размер конечной расчетной области составлял 32×32 пикселей для того, чтобы иметь сравнительно малый уровень шума. Ошибка определения смещения не превышает 0,1 пикселя. Таким образом, погрешность измерения скорости составляет 1% и 4% при смещении трассеров на 8 и 2 пикселя, соответственно.

Также для анализа пространственной структуры возникающей паровой каверны была проведена визуализация течений скоростной камерой PCO. 1200hs с частотой 1500 кадров в секунду из двух положений перпендикулярно направлению потока – горизонтального и вертикального.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Визуализация

Результаты визуализации возникающих кавитационных каверн при обтекании пластины и профиля NACA0015 представлены на Рис. 3 и Рис. 4, соответственно, для двух положений камеры – сбоку и сверху.

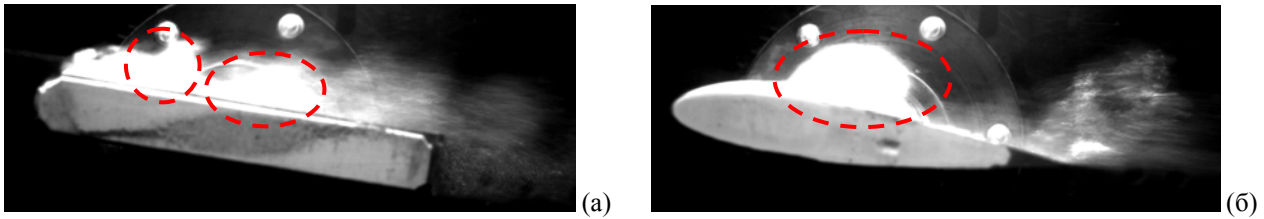


Рис. 3. Визуализация кавитационной каверны (вид сбоку), возникающей при обтекании (а) пластины при $\sigma = 3,5$ и (б) профиля NACA0015 при $\sigma = 2,4$, $\alpha = 9^\circ$

На Рис. 3 за передней кромкой верхней поверхности пластины и за лобовой точкой над верхней поверхностью профиля можно видеть развитую паровую каверну; для данных параметров ее продольный размер составляет примерно пятую часть от длины пластины и третью часть от длины профиля (Рис. 4). В обоих случаях граница каверны имеет выраженную волнообразную форму (Рис. 3). На Рис. 4 можно видеть, что в обоих случаях структура каверны существенно трехмерна: она состоит из большого числа нестационарных продольных структур. Каждая из этих продольных структур периодически отрывается и сносится вниз по течению. Вниз по потоку с увеличением локального давления пузыри схлопываются, и концентрация паровой фазы уменьшается. Кроме того, на Рис. 4 можно видеть отдельные области локализации кавитационных пузырей (далее "облака пузырей"), обведенные красными пунктирными линиями. Положение этих облаков в некоторый момент времени, как ожидается, соответствует положению крупномасштабных вихревых структур, внутри которых достигается минимум давления.

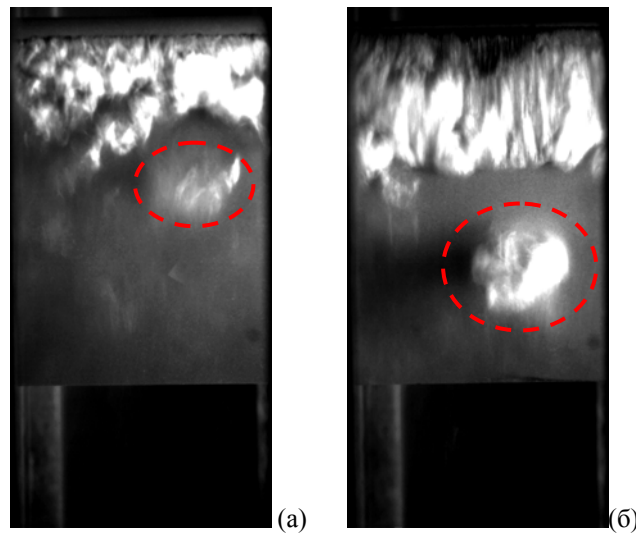


Рис. 4. Визуализация кавитационной каверны (вид сверху), возникающей при обтекании (а) пластины при $\sigma = 3,5$ и (б) профиля NACA0015 при $\sigma = 2,4$, $\alpha = 9^\circ$

Следует отметить, что в случае с профилем кавитация возникает при большей скорости течения и, соответственно, при больших числах Рейнольдса и меньших числах кавитации, чем в случае с пластиной, так как форма профиля является более обтекаемой. Так, при $\sigma = 2,4$ на профиле NACA0015 кавитации не наблюдалось. Также в случае с профилем кавитационные облака, отрывающиеся от каверны, являются более выраженными (Рис. 3 и Рис. 4), чем в случае с пластиной. Это косвенно указывает на то, что интенсивность крупномасштабных вихревых структур, эволюционирующих вдоль слоя смешения в следе за профилем существенно выше.

Измерение мгновенной скорости

Методика PIV для измерения полей мгновенной скорости и завихренности потока применялась на флуоресцентных трассерах, что позволило регистрировать их на длине волны, отличной от длины волны излучения лазера. Следует отметить, что в данном случае свет лазера, отраженный от пузырей в камеру, оказывает негативное действие на качество изображений частиц. Типичные изображения, полученные методом PIV без использования и с использованием оптического фильтра, представлены на Рис. 5. Можно видеть, что без применения фильтра кавитационные пузыри создают яркие блики на изображении, причем интенсивность отраженного ими света выше, чем интенсивность самих трассеров (Рис. 5 (а, б)). В результате это делает невозможным применение PIV на "обычных" трассерах для измерения скорости жидкости в условиях кавитации. 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. 5 (в, г)). С применением жестких критериев отсева (Peak Validation – 2.0, Adaptive 7x7 Median Filter) удается избавиться от неверных векторов, положение которых в большинстве случаев соответствует положению занятых кавитационными кавернами областей. Таким образом, удается выделить сигнал от непрерывной фазы. Однако скорость пузырей остается неопределенной.

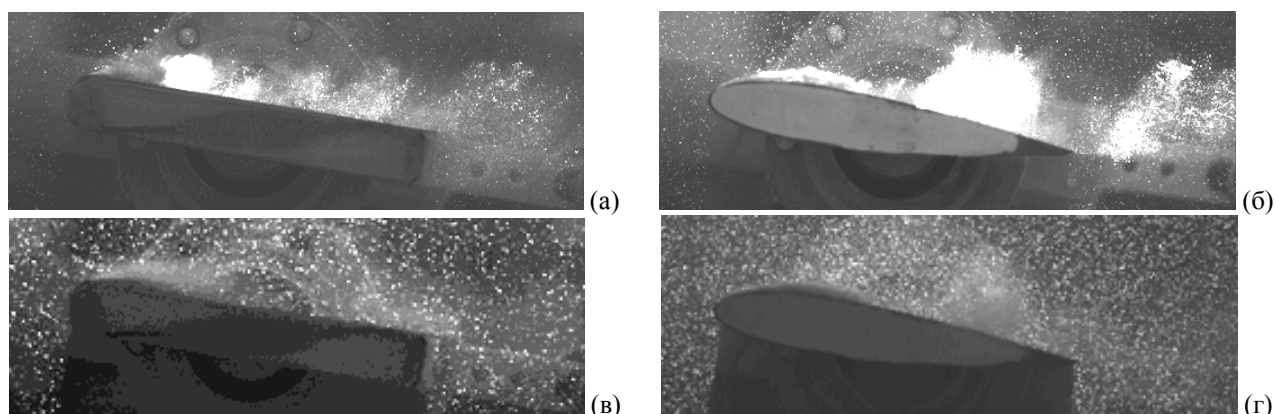


Рис. 5. Мгновенные изображения, полученные методом PIV с использованием (а, б) обычных и (в, г) флуоресцентных трассеров, при обтекании (а, в) пластины при $\sigma = 3,5$ и (б, г) профиля NACA0015 при $\sigma = 2,4$ м/с. $\alpha = 9^\circ$

В результате измерений полей мгновенной скорости турбулентного обтекания пластины и профиля NACA0015, а также набора статистики в 1000 двухкадровых изображений были рассчитаны пространственные распределения средней скорости (Рис. 6) и кинетической энергии турбулентности (Рис. 8). Поскольку в экспериментах лазерный "нож" распространялся вертикально сверху вниз вдоль плоскости симметрии канала, параллельной большей боковой стенке, область течения под пластиной и профилем была затенена и поэтому на рисунках замаскирована серым цветом. Те области течения, где средняя скорость локально направлена против основного потока, имеют белый цвет и соответствуют зонам возвратного течения (рис. 6а). На всех представленных ниже рисунках помимо кавитационных режимов обтекания, которые были рассмотрены ранее, для сравнения (под литерой "в") также представлены характеристики докавитационного режима обтекания профиля NACA0015 при том же числе кавитации, что и для пластины ($\sigma = 3,5$).

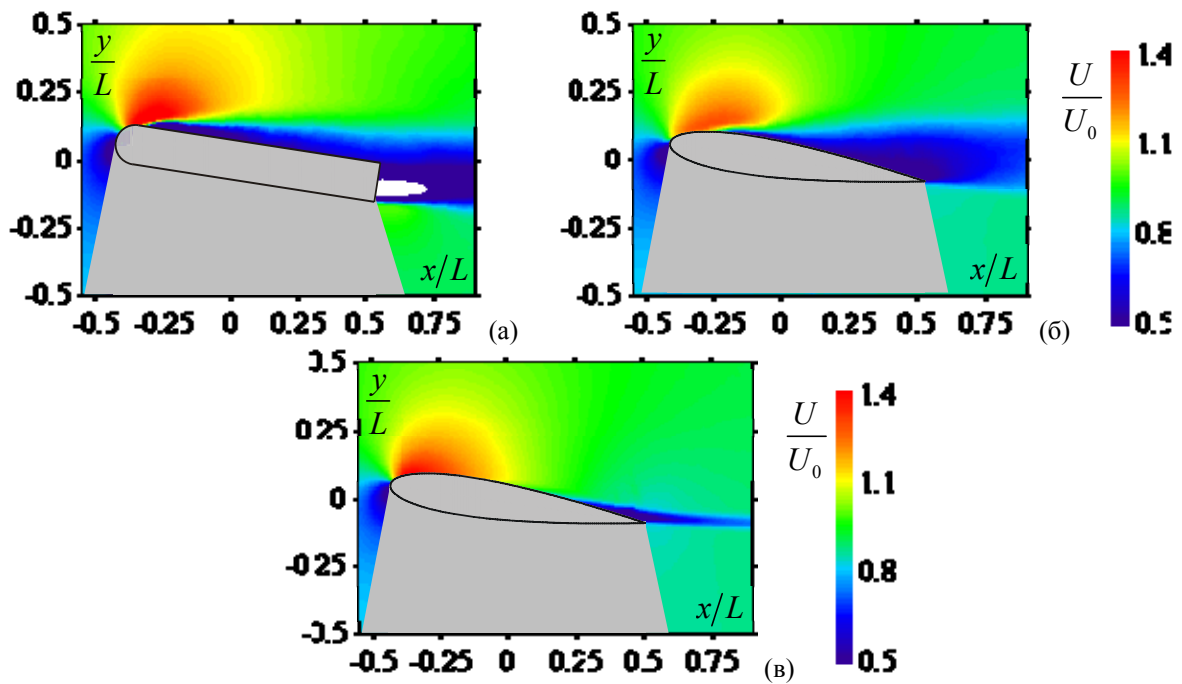


Рис. 6. Пространственные распределения продольной компоненты средней скорости при обтекании (а) пластины при $\sigma = 3,5$ и профиля NACA0015 при (б) $\sigma = 2,4$ и (в) $\sigma = 3,5$. $\alpha = 9^\circ$. Начало координат соответствует центру тел обтекания

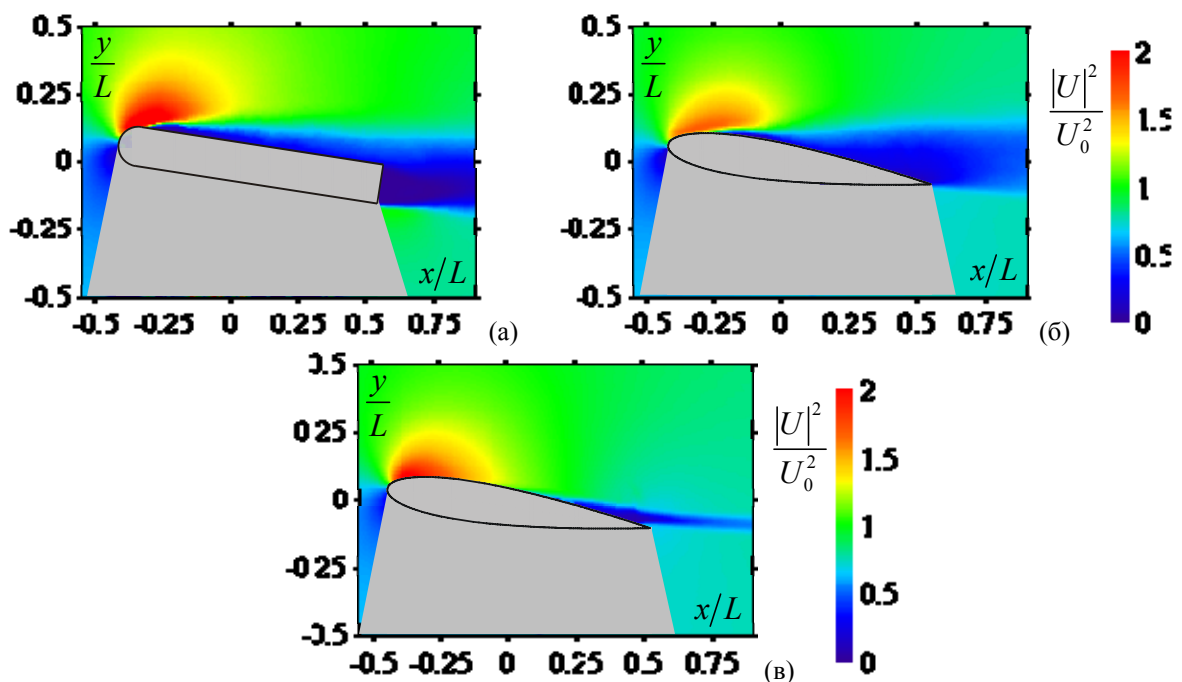


Рис. 7. Пространственные распределения квадрата модуля средней скорости при обтекании (а) пластины при $\sigma = 3,5$ и профиля NACA0015 при (б) $\sigma = 2,4$ и (в) $\sigma = 3,5$. $\alpha = 9^\circ$. Начало координат соответствует центру тел обтекания

На Рис. 6 можно видеть, что перед лобовой точкой как пластины, так и профиля скорость течения локально становится меньше среднерасходной скорости U_0 , т.е. происходит торможение потока. Причем область торможения в обоих случаях смещена к нижней поверхности тел. Для обоих тел обтекания в некоторой области течения, расположенной над их верхней поверхностью, локально средняя скорость становится больше U_0 (Рис. 6). Причем для пластины максимальное значение продольной компоненты средней скорости $U_{max}/U_0 \approx$

1,51 в точке $(x/L = -0,28; y/L = 0,15)$, для профиля NACA0015 $U_{max}/U_0 \approx 1,4$ при $U_0 = 8,7$ м/с в точке $(x/L = -0,34; y/L = 0,1)$ и $U_{max}/U_0 \approx 1,3$ при $U_0 = 10,7$ м/с в точке $(x/L = -0,24; y/L = 0,14)$.

Поскольку перед обоими телами обтекания течение можно считать в существенной степени равномерным и безвихревым, то по закону Бернулли можно оценить распределение локального давления в той области измерительной плоскости, где течение еще является ламинарным (т.е. где отсутствуют пульсации скорости). В таком случае можно ожидать, что в тех областях течения, где квадрат модуля средней скорости $|U|^2$ достигает максимальных значений, поле давления имеет локальный минимум, и наоборот (Рис. 7). Соответственно, можно предположить, что в среднем наиболее интенсивное зарождение парогазовых пузырей происходит именно в тех областях, где квадрат модуля скорости максимален, т.е. для двух представленных случаев – с внешней стороны сдвигового слоя. Вниз по потоку происходит лишь снос пузырей.

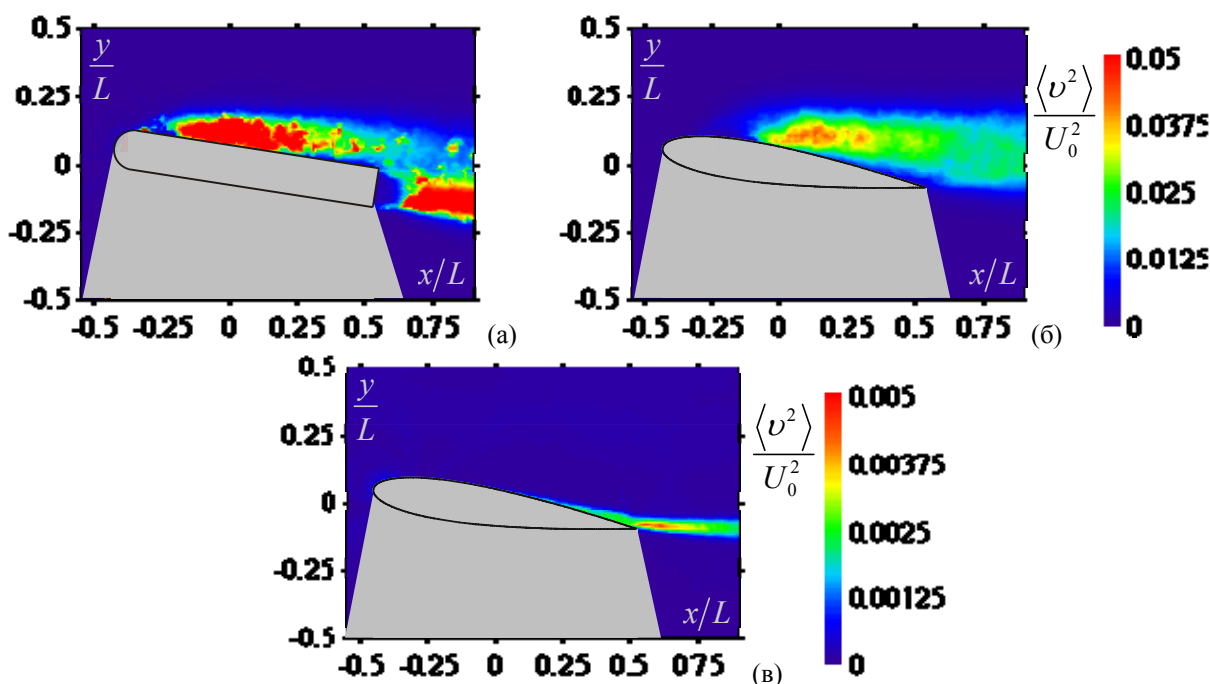


Рис. 8. Пространственные распределения поперечной компоненты кинетической энергии турбулентности при обтекании (а) пластины при $\sigma = 3,5$ и профиля NACA0015 при (б) $\sigma = 2,4$ и (в) $\sigma = 3,5$. $\alpha = 9^\circ$. Начало координат соответствует центру тел обтекания

Также необходимо заметить, что при кавитационных режимах обтекания как пластины (за ее передней кромкой), так и профиля (за наибольшим сечением, Рис. 6а, б) вблизи верхней поверхности расположена область, где значение средней скорости существенно меньше U_0 , при этом возвратного течения на средних характеристиках в обоих случаях не наблюдается. Таким образом, при кавитационном обтекании как пластины, так и гидрокрыла вниз по течению от области максимальной средней скорости (и как следствия минимума давления) возникает турбулентный след. Можно видеть, что при бескавитационном обтекании гидрокрыла след возникает только в области задней кромки (Рис. 6в). Таким образом, можно сделать вывод, что генерация кавитационных пузырей изменяет структуру всего турбулентного обтекания тел, в частности приводит к существенной турбулентизации потока над поверхностью тела (к значительному росту амплитуды пульсаций скорости, Рис. 8а, б) и возникновению следа с поперечным размером до $0,3L$. Это без сомнения ухудшает гидродинамическое качество крыла.

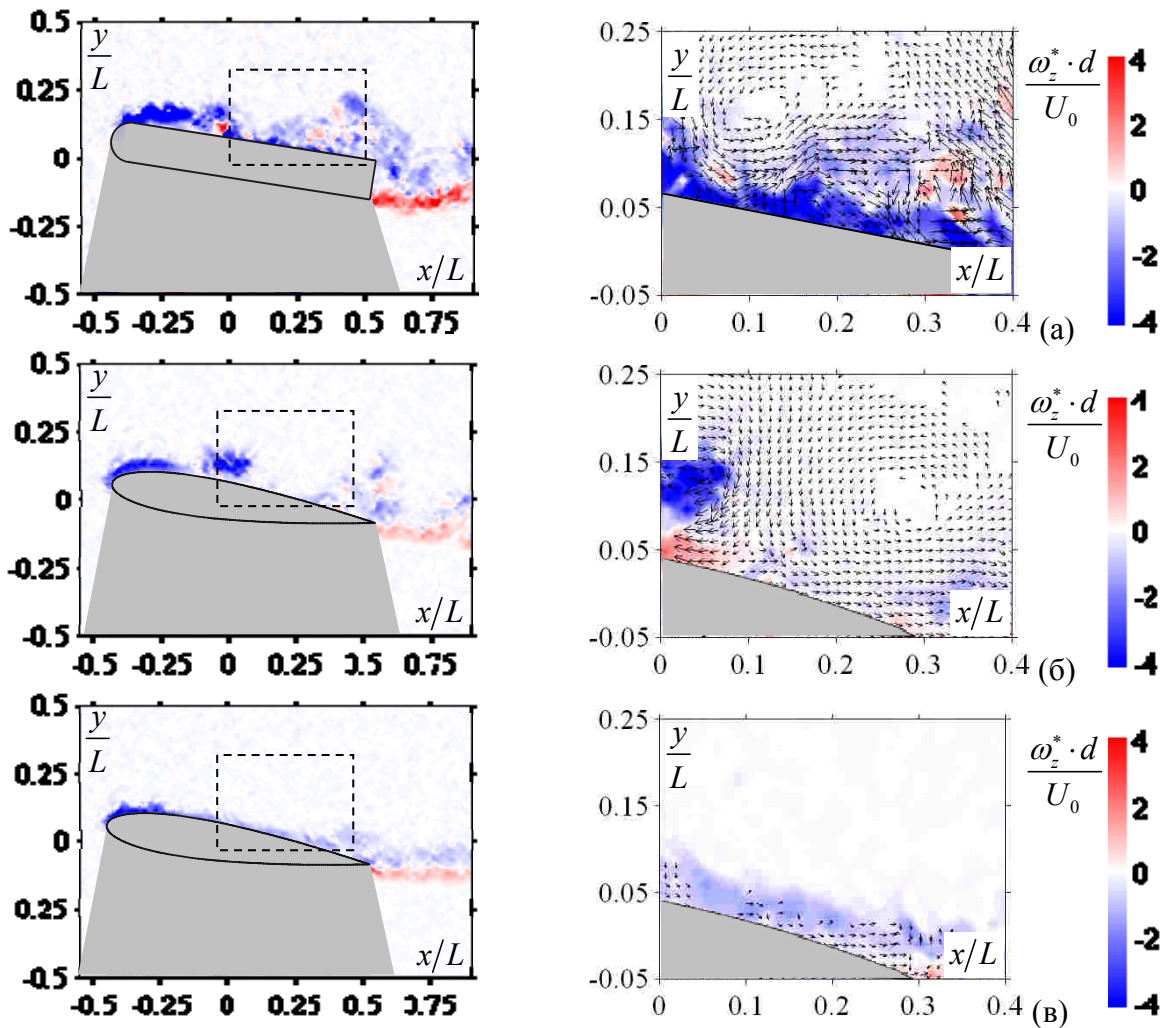


Рис. 9. Пространственные распределения мгновенной завихренности и пульсационной компоненты мгновенной скорости при обтекании (а) пластины при $\sigma = 3,5$ и профиля NASA0015 при (б) $\sigma = 2,4$ и (в) $\sigma = 3,5$. $\alpha = 9^\circ$. Начало координат соответствует центру тел обтекания

Более того, за задним краем пластины продольная компонента средней скорости имеет отрицательные значения, что свидетельствует о наличии зоны рециркуляции. На Рис. 8 (а) можно видеть, что на расстоянии, равном примерно толщине пластины, от ее заднего края вниз по течению находится область интенсивных пульсаций скорости, возникающая вследствие отрыва потока и большего значения градиента средней скорости за торцом пластины, по сравнению с гидрокрылом. Это оказывает еще больший негативный эффект с точки зрения повышения гидродинамического качества крыла.

Анализируя распределения поперечной компоненты кинетической энергии турбулентности на Рис. 8, можно видеть, что для профиля NASA0015 на докавитационном режиме обтекания ($\sigma = 3,5$) значительные турбулентные пульсации скорости присутствуют только в области за задней кромкой и достигают сравнительно небольших значений: $\langle v^2 \rangle_{max} / U_0^2 \approx 0,0046$ в точке ($x/L = 0,6$; $y/L = -0,1$). Причем, как можно видеть, в случае кавитационного режима обтекания ($\sigma = 2,4$) амплитуда пульсаций скорости становится примерно на порядок выше, чем без нее. $\langle v^2 \rangle$ достигает значения в $0,044U_0^2$ над верхней поверхностью в точке ($x/L = 0,12$; $y/L = 0,1$). В случае же пластины максимальное значение поперечной компоненты кинетической энергии турбулентности $\langle v^2 \rangle_{max}$ достигает $0,24U_0^2$ над ее верхней поверхностью в точке ($x/L = -0,05$; $y/L = 0,12$) и $0,13U_0^2$ в следе в точке ($x/L = 0,8$; $y/L = -0,12$), что соответствует амплитуде пульсаций скорости в 50% и 36% соответственно.

Как уже упоминалось, за телами обтекания на всех режимах присутствует след с двумя "параллельными" слоями смещения вдоль направления потока (Рис. 6). Как можно видеть из

распределений мгновенной скорости и завихренности, представленных на Рис. 9, в них формируются вихревые структуры, которые в верхнем и нижнем слоях имеют противоположное направление закрутки: отрицательные значения для верхнего слоя смещения – вращение по часовой стрелке, положительные значения для нижнего – вращение против часовой стрелки. Для визуализации только крупномасштабных вихревых структур, оказывающих определяющее значение на локальное изменение давления и, как следствие, на генерацию кавитационных пузырей в турбулентном потоке, при расчете завихренности использовался фильтр скользящего среднего размером 5×5 пикселей, что сглаживало вихри (только для Рис. 9) размером менее 0,37 мм. На Рис. 9 (в) можно видеть, что вихревой след за профилем представляет собой вихревую дорожку относительно слабой интенсивности. В верхнем слое смещения эти вихри формируются еще в пограничном слое.

На кавитационных режимах обтекания за передней кромкой пластины и за лобовой точкой профиля помимо вихревой дорожки происходит также зарождение крупномасштабных вихревых структур, далее – КВС (Рис. 9 (а, б)). Причем их интенсивность в случае кавитационного обтекания крыла значительно превосходит интенсивность вихрей за задней кромкой, что коррелирует с распределениями поперечной компоненты кинетической энергии турбулентности. В случае пластины можно видеть, большие значения мгновенной завихренности за нижней кромкой, что обусловлено наличием зоны рециркуляции и высоким значением градиента скорости. Ожидается, что кавитационные пузыри локализуется в КВС, что, как известно, приводит к увеличению их размера и интенсивности завихренности. Это объясняет тот факт, что КВС наибольшей интенсивности наблюдаются за областью максимальных значений средней скорости, где, как можно ожидать, главным образом и происходит зарождение пузырей. Также следует отметить, что в случае кавитационного обтекания крыла и пластины на мгновенных распределениях скорости наблюдался отрыв потока от верхней поверхности. Таким образом, из полученных результатов можно заключить, что процесс является существенно нелинейным. Возникновение кавитации приводит к отрыву потока, увеличению размеров турбулентного следа и интенсивности пульсаций скорости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была использована методика PIV на флуоресцентных трассерах для измерения полей мгновенной скорости и завихренности турбулентного потока при кавитационном и бескавитационном обтекании пластины с закругленным торцом и гидрокрыла НАСА0015. На основе измеренных ансамблей полей мгновенной скорости были рассчитаны пространственные распределения средней скорости и компонент кинетической энергии турбулентности непрерывной фазы.

Было показано, что на режиме с развитой кавитацией гидродинамическая структура всего течения претерпевает существенные изменения по сравнению с бескавитационным обтеканием. Показано, что возникновение кавитации при обтекании гидрокрыла приводит к формированию турбулентного следа уже за передней кромкой (вниз по течению за областью максимальных значений средней скорости), значительному увеличению его поперечных размеров, а также к интенсификации турбулентных пульсаций (примерно в 10 раз), вследствие генерации крупномасштабных вихревых структур в области паровой каверны. В случае обтекания пластины вследствие неоптимальной формы, кавитация возникала при меньших значениях скорости набегающего потока, при этом за задним торцом формировалась зона рециркуляции. Наличие зоны рециркуляции за торцом приводило к появлению еще более интенсивных вихревых структур и росту турбулентных пульсаций, в том числе и за передней кромке. В целом работа показывает, что вследствие нелинейной природы турбулентных течений процесс кавитации при обтекании модельного объекта существенно меняет всю картину обтекания. При этом становится очевидным то, что в современных численных методах моделирования должны быть учтены эти особенности турбулентного обтекания.

Для более полного анализа структуры потока, очевидно, необходимо одновременно измерять скорость непрерывной фазы одновременно со скоростью и концентрацией дисперсной фазы. Такое исследование будет возможным при использовании современной флуоресцентной методики визуализации пузырей [1] и запланировано в последующих работах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана интеграционными исследовательскими проектами РАН и СО РАН и РФФИ (грант 10-08-01304-а), а также Лаврентьевским конкурсом молодежных проектов СО РАН (постановление № 346).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$P_{нар}$ – давление насыщенных паров воды при данных условиях, Па

P_{∞} – статическое давление на бесконечности, Па

P – статическое давление, измеряемое на стенке рабочего канала, Па

α – угол атаки, °

L – размер хорды гидрокрыла, м

x, y, z – координаты вдоль продольной, поперечной и нормальной осей, м

U_0 – среднерасходная скорость потока, м/с

U – продольная компонента средней скорости жидкости, м/с

v – поперечная компонента пульсационной составляющей скорости, м/с

$|U|$ – вектор средней скорости, м/с

ω_z^* – нормальная компонента мгновенной завихренности, 1/с

Re – число Рейнольдса

Sh – число Струхала

σ – число кавитации

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В.** Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Выч. технологии. 2007. № 2. С. 1-23.
- 2 **Akhmetbekov Ye.K., Alekseenko S.V., Dulin V.M., Markovich D.M., Pervunin K.S.** Planar fluorescence for round bubble imaging and its application for the study of an axisymmetric two-phase jet // Exp. Fluids. 2010. № 48. P. 615-629.
- 3 **An H., Plesniak M.W.** Cavitation structures in a Venturi flow with various backward facing steps // J. Fluids Eng. 2008. V. 130. P. 7.
- 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 // Phys. Fluids. 2010. V. 22. P. 14.
- 5 **Choi J., Ceccio S.L.** Dynamics and noise emission of vortex cavitation bubbles // J. Fluid Mech. 2007. V. 575. P. 1-26.
- 6 **Dattarajan S., Johari H.** Control of a separating boundary layer with Lorentz force actuators // Phys. Fluids. 2008. V. 20. P. 15.
- 7 **Foeth E.J., van Doorne C.W.H., van Terwisga T., Wieneke B.** Time resolved PIV and flow visualization of 3D sheet cavitation // Exp. Fluids. 2006. V. 40. P. 503-513.
- 8 **Gopalan Sh., Katz J., Liu H.L.** Effect of gap size on tip leakage cavitation inception, associated noise and flow structure // J. Fluids Eng. 2002. V. 124. P. 994-1004.
- 9 **Gopalan Sh., Katz J.** Flow structure and modeling issues in the closure region of attached cavitation // Phys. Fluids. 2000. V. 12, № 4. P. 895-911.
- 10 **Laberteaux K.R., Ceccio S.L.** Partial cavity flows. Part 1. Cavities forming on models without spanwise variation // J. Fluid Mech. 2001. V. 431. P. 1-41.

11 **Tassin A.L., Li C.-Y., Ceccio S.L., Bernal L.P.** Velocity field measurements of cavitating flows // Exp. Fluids. 1995. V. 20. P. 125-130.

A.Yu. Kravtsova¹, D.M. Markovich^{1,2}, K.S. Pervunin¹, M.V. Timoshevskiy^{1,2}

1 Institute of Thermophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrentyev Ave., 1

2 Novosibirsk State University, Russia, 630090, Novosibirsk, Pirogova Str., 2,

E-mail: dmark@itp.nsc.ru

APPLICATION OF PIV/LIF TECHNIQUE FOR STUDY OF TURBULENT STRUCTURE OF CAVITATING FLOWS AROUND 2D MODELS

The work is devoted to application of PIV technique applied to fluorescent tracer particles for study of turbulent structure of unsteady cavitating flows around two-dimensional models, namely a parallel-sided plate with hemi-spherical nose and blunt stern (bluff body) and a NACA 0015 series hydrofoil. As a result, spatial distributions of instantaneous velocity and vorticity around the bodies were measured as well as those of the mean flow velocity and a full set of turbulent statistical moments including the third-order ones. Subsequently, a comparison between the fields of all those characteristics was performed for both the plate and the hydrofoil section. Besides, data on visualization of vapour cavities are presented in the paper, which allows to examine their spatial structure and dynamics qualitatively. In general, cloud cavitation onset is shown to change the whole flow pattern substantially.

CAVITATING FLOW, PARTIAL CAVITY, TURBULENT STRUCTURE, NACA0015, PIV/LIF, HIGH-SPEED VISUALIZATION