

УДК 532.528 + 532.574.7 + 532.582.32

ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИИ НА ТУРБУЛЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ОБТЕКАНИИ ТЕЛ

Азарова А.Ю.¹, Дулин В.М.¹, Маркович Д.М.^{1,2}, Первунин К.С.¹

¹*Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

Работа частично поддержана РФФИ (грант 10-08-01304-а),
Лаврентьевским конкурсом молодежных проектов СО РАН (постановление № 346)
и конкурсом молодежных научно-исследовательских проектов ИТ СО РАН (протокол № 10-2009).

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты визуализации кавитационных каверн и измерений скорости турбулентных течений с помощью методики PIV (Particle Image Velocimetry) при обтекании плоско-параллельной пластины с закругленным передним торцом и профилированного крыла NASA0015. Получены пространственные распределения мгновенной скорости и завихренности в исследуемых течениях, рассчитаны пространственные распределения средней скорости и кинетической энергии турбулентности. Проведен анализ пространственной структуры кавитационных каверн и сравнение турбулентной структуры течений на кавитационных и докавитационных режимах обтекания.

ВВЕДЕНИЕ

Основными условиями безопасной и эффективной работы гидроэнергетических систем являются надежность и долговечность используемого оборудования. Как правило, работа энергетических агрегатов сопровождается наличием нестационарного турбулентного течения сложной геометрии, зачастую являющегося двухфазным. Повышение ресурса работы, увеличение КПД гидромашин и степени их безопасности, невозможно без изучения гидродинамических процессов, существенную роль в которых играют крупномасштабные вихревые структуры и кавитация. Очевидно, что исследование динамики нестационарных вихревых структур в турбулентных течениях в элементах гидротурбин и их взаимодействия с парогазовой фазой является актуальной задачей.

Известно, что в определенных случаях кавитационное обтекание гидрокрыльев становится неустойчивым за счет колебаний длины каверны. В работе [2] выделяется два класса неустойчивостей: неустойчивость системы как целого, в результате которой колебания возникают при взаимодействии кавитирующего потока с различными частями системы (входного и выходного трубопроводов, резервуаров, клапанов и др.), и неустойчивости, присущие самой каверне.

Типичным примером неустойчивостей второго класса является так называемая "облачная кавитация". Когда каверна в виде пленки на гидрокрыле достигает определенного размера, начинаются сильные периодические осцилляции со сходом ка-

верной скорости и завихренности в исследуемых течениях, рассчитаны пространственные распределения средней скорости и кинетической энергии турбулентности. Проведен анализ пространственной структуры кавитационных каверн и сравнение турбулентной структуры течений на кавитационных и докавитационных режимах обтекания.

верн в виде облаков вниз по течению на каждом цикле колебаний. Исследования в работах [1], [4], [6] доказали связь между облачной кавитацией и возвратной струей, порождаемой при замыкании каверны в результате действия противоположно направленного градиента давления, зарегистрированного для длин каверны, больших половины хорды профиля.

Несмотря на большое количество работ, представленных в литературе по изучению кавитации, до сих пор детальная количественная информация крайне ограничена даже для упрощенных условий. 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 и развитие кавитации, основной интерес представляет исследование процессов в канонических геометрических условиях (сопла Вентури, модельные профили, например крылья серий NASA, и т.п.). В зависимости от условий (форма обтекаемой поверхности, скорость и давление в потоке и т.д.) различают многообразие типов кавитации (пузырьковую, вихревую, облачного типа, суперкавитацию и т.д.). Получение систематической экспериментальной информации для различных кавитационных режимов является крайне важной задачей.

За последние два десятилетия получили активное развитие методы измерения полей скорости в однофазных и многофазных течениях - Particle Image Velocimetry (PIV) и Particle Tracking Velocimetry (PTV). Использование таких подходов позволяет получать принципиально новую информацию о нестационарных кавитационных турбулентных течениях: ансамбли полей мгновенной скорости и завихренности, поля средней скорости, а также пространственные распределения интенсивности турбулентных пульсаций скорости непрерывной и дисперсной фаз. Такая информация является чрез-

вычайно востребованной для более глубокого понимания закономерностей процессов, происходящих в кавитирующих течениях и для развития современных методов численного моделирования потоков в элементах гидротурбин при больших числах Рейнольдса.

Таким образом, цель данной работы – систематическое изучение обтекания тел различной геометрии, в том числе в условиях кавитации, и получение наиболее полной экспериментальной информации об их турбулентной структуре.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Экспериментальная установка представляет собой замкнутый гидродинамический контур. Стенд оснащен двумя центробежными насосами, ультразвуковым расходомером и датчиками давления (см. рис.1). Общие габариты установки: длина – 7,76 м, высота – 2,2 м, ширина – 1,1 м. Температура рабочей жидкости (воды) в контуре поддерживается постоянной путем подачи в теплообменный контур

охлаждающей воды, расход которой регулируется с помощью ПИД-редуктора с обратной связью от датчика температуры. Статическое давление в контуре задается путем подачи воздуха из бака постоянного давления в контур через редуктор. Скорость вращения насосов поддерживается постоянной и регулируется с помощью преобразователей частоты.

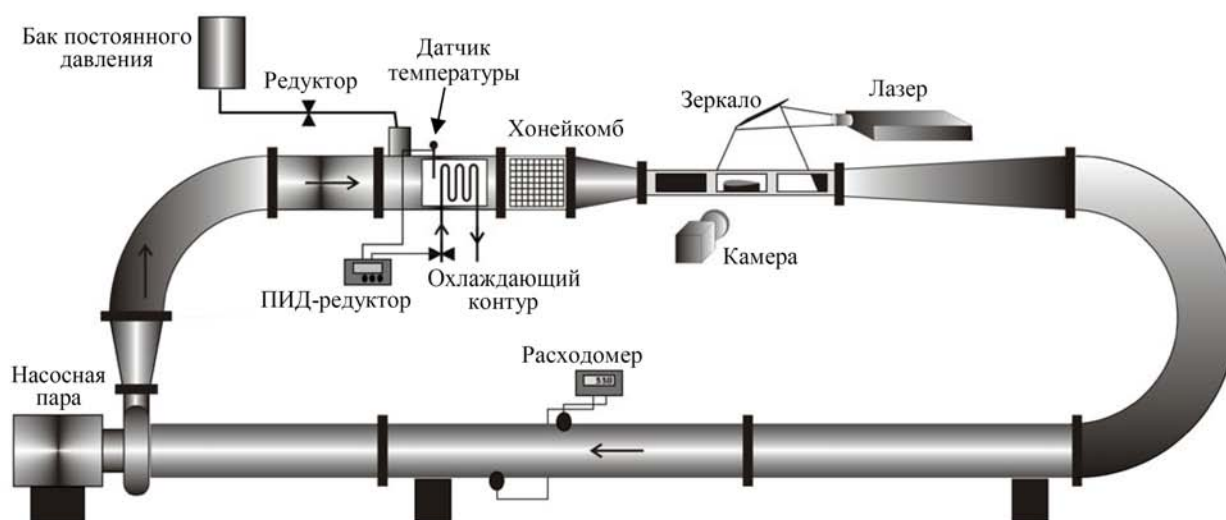


Рис.1 Схема напорного гидродинамического кавитационного стенда.

Рабочая часть установки состоит из хонейкомба с ячейками $20 \times 20 \text{ мм}^2$ и длиной 500 мм, конфузора длиной 790 мм и рабочего участка, представляющего собой канал прямоугольного поперечного сечения $0,08 \times 0,25 \text{ м}^2$ длиной 1,3 м с плоскими параллельными боковыми стенками. Боковые стенки рабочего участка снабжены смотровыми окнами. За рабочим участком расположен диффузор с углом раскрытия $3,5^\circ$. Обратный канал выполнен из поворотного колена, расходомерного участка и трубопровода, обеспечивающего подвод жидкости к на-

сосной группе. Максимальный суммарный расход жидкости составляет $1100 \text{ м}^3/\text{ч}$, что соответствует максимальной среднерасходной скорости для рабочего канала с поперечным сечением $0,08 \times 0,25 \text{ м}^2$ – $15,3 \text{ м/с}$.

В качестве тел обтекания были использованы плоскопараллельная пластина с закругленным передним торцом (длина – 100 мм, ширина – 15 мм) и профилированное крыло NACA0015 с длиной большей хорды 100 мм (см. рис.2), изготовленные из латунного сплава.

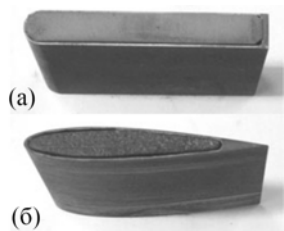


Рис.2. Фотографии (а) плоскопараллельной пластины с закругленным передним торцом и (б) профилированного крыла NASA0015, использованных в экспериментах.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для анализа мгновенной структуры кавитационных каверн была проведена визуализация течений скоростной камерой PCO. 1200hs с частотой 1000 кадров в секунду из двух положений – сбоку и сверху.

Измерение полей скорости проводилось с помощью PIV-системы «ПОЛИС», состоящей из двойного импульсного Nd:YAG-лазера (длина волны излучения 532 нм, длительность импульса 5 нс, энергия в импульсе 50 мДж), CCD-камеры (глубина цвета 10 бит, разрешение матрицы 2048×2048 пикселей) с оптическим высокочастотным фильтром (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 посредством программного пакета «ActualFlow». Толщина лазерного "ножа", сформированного цилиндрической линзой, составляла около 0,8 мм в измерительной области. Сечение, в котором проводились

РЕЗУЛЬТАТЫ

Визуализация

Результаты визуализации кавитационных каверн представлены на рис.3 и рис.4 для двух положений камеры – сбоку и сверху.

На рис.3 над верхней поверхностью как пластины, так и профиля NASA0015 можно видеть развитую кавитационную каверну. Для данных параметров течения ее продольный размер составляет примерно пятую часть от длины пластины и третью часть от длины профиля (см. рис.4). В обоих случаях граница каверны имеет выраженную волнообразную форму (см. рис.3). Это объясняется тем, что за передней кромкой пластины и за лобовой точкой профиля возникает сдвиговой слой вдоль направления течения. В слое смещения формируются и развиваются вниз по течению вихревые структуры, которые, проходя рядом с границей каверны, захватывают пузыри (см. рис.3). При удалении от пластины локальное давление возрастает, что приводит к постепенному схлопыванию пузырей внутри

В ходе экспериментов, представленных в данной работе, варьировалась среднерасходная скорость набегающего потока. Угол атаки был фиксирован и равен 9° . Статическое давление в контуре и температура жидкости поддерживались постоянными и составляли 1,35 атм и 25°C , соответственно. Рабочей жидкостью служила деаэрированная дистиллированная вода. Число Рейнольдса Re , рассчитанное по среднерасходной скорости течения в рабочем канале U_0 и поперечному размеру тела обтекания d (одинаковый для профиля NASA0015 и пластины), равнялось 125000 для $U_0 = 7,5$ м/с и 153000 для $U_0 = 9,2$ м/с. Число кавитации $\sigma = 2 \cdot (P_0 - P_{не}) / \rho U_0^2$ составляло 3,37 при $U_0 = 7,5$ м/с и 2,12 при $U_0 = 9,2$ м/с.

измерения, было расположено посередине канала вдоль большей его стороны. Расстояние от камеры до лазерного "ножа" составляло около 720 мм. Размер измерительной области составлял 163×122 мм. Для проведения PIV измерений в поток добавлялись флуоресцентные трассеры (средний размер 20 мкм, диапазон длин волн излучения флуоресцентных частиц $550 \div 700$ нм).

Для расчета полей скорости использовался итерационный кросскорреляционный алгоритм с подпиксельной интерполяцией и нецелым смещением областей и 50% перекрытием между ними. Для того, чтобы иметь сравнительно большой динамический диапазон, размер начальной расчетной области соответствовал 64×64 пикселям. Размер конечной расчетной области составлял 32×32 пикс., являющийся оптимальным для обеспечения малого уровня шума. Ошибка определения смещения не превышала 0,1 пикселя.

кавитационных каверн и падению их концентрации. На рис.4 можно видеть, что для обоих тел об-

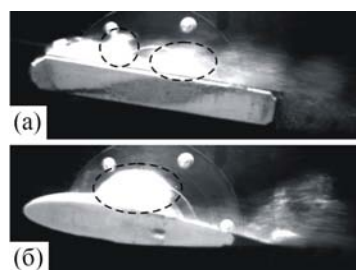


Рис.3. Визуализация кавитационной каверны (вид сбоку), возникающей при обтекании (а) пластины при $U_0 = 7,5$ м/с и (б) профиля NASA0015 при $U_0 = 9,2$ м/с. Угол атаки $\alpha = 9^\circ$.

течения структура каверны неоднородна: она состоит из большого числа продольных структур. Каждая из них периодически отрывается и сносится вниз по течению. Таким образом, кавитационная каверна является существенно трехмерной.

При обтекании профиля *NACA0015* кавитация возникает при большей скорости течения и, соответственно, при больших числах Рейнольдса и меньших числах кавитации σ , чем в случае с пластиной. Это согласуется с работой [5], в которой

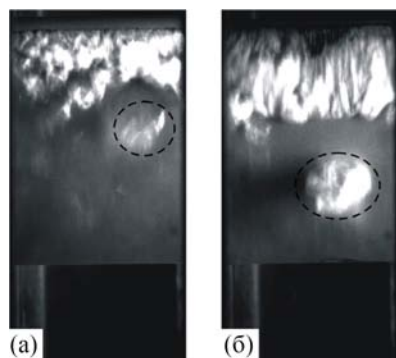


Рис.4. Визуализация кавитационной каверны (вид сверху), возникающей при обтекании (а) пластины при $U_0 = 7,5$ м/с и (б) профиля *NACA0015* при $U_0 = 9,2$ м/с. Угол атаки $\alpha = 9^\circ$.

показано, что кавитационные каверны возникают при $\sigma < 3$. При обтекании профиля *NACA0015* кавитационные облака (выделены кружками черного цвета), отрывающиеся от каверны, являются более выраженными (см. рис.3 и рис.4), чем в случае с пластиной. Это говорит о том, что интенсивность крупномасштабных когерентных структур, распространяющихся вдоль сдвигового слоя, в случае с профилем существенно выше.

Поля скорости

Для измерения скорости течения с помощью методики PIV применялись флуоресцентные трассеры. 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 (см. рис.5 (а) и (б)). В результате это делает невозможным применение методики PIV на "обычных" трассерах для измерения скорости в кавитирующих потоках. Использование оптического фильтра позволяет избавиться от ярких бликов на изображениях, создаваемых пузырями. В этом случае облас-

ти, занятые пузырями, выглядят как размытые пятна (см. рис.5 (в) и (г)). Применение жестких критериев отсева позволяет практически полностью избавиться от неверных векторов, которые в большинстве случаев расположены в занятых пузырями областях, и, таким образом, выделить сигнал от непрерывной фазы. Однако скорость пузырей в этом случае остается неопределенной.

В результате были измерены мгновенные поля скорости и завихренности (см. рис.8), а также рассчитаны пространственные распределения средней скорости (см. рис.6) и кинетической энергии турбулентности (см. рис.7). Вся измерительная область освещалась лазерным "ножом" сверху, поэтому под пластиной и профилем область течения была затенена и на рисунках замаскирована серым цветом.

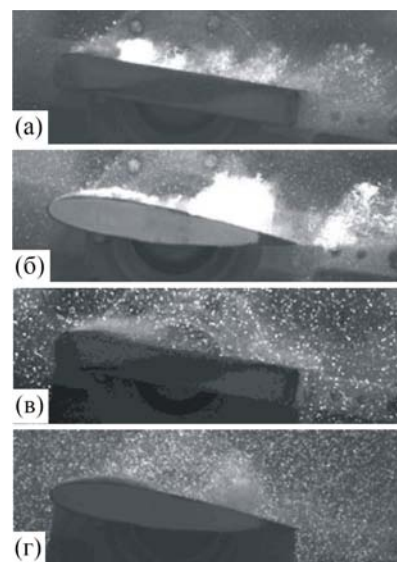


Рис.5. Мгновенные изображения, полученные методом PIV с использованием (а, б) обычных и (в, г) флуоресцентных трассеров, при обтекании (а, в) пластины при $U_0 = 7,5$ м/с и (б, г) профиля *NACA0015* при $U_0 = 9,2$ м/с. Угол атаки $\alpha = 9^\circ$.

На рис.6 (а) область белого цвета, обведенная черной линией, соответствует отрицательным значениям средней скорости, то есть течение направлено против основного потока. На рисунках 6 - 8 представлены кавитационные режимы обтекания под буквами (а) и (б) для пластины и профиля *NACA0015* соответственно, для сравнения под литерой (в) показаны характеристики безкавитационного режима обтекания профиля *NACA0015* при той же среднерасходной скорости, что для случая с пластиной.

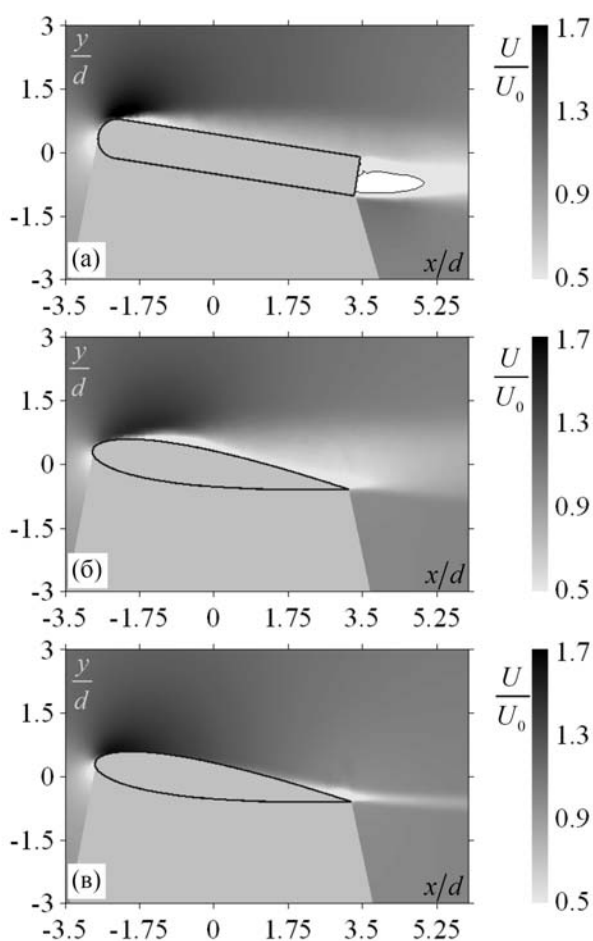


Рис.6. Пространственные распределения продольной компоненты средней скорости при обтекании (а) пластины при $U_0 = 7,5$ м/с и профиля NASA0015 при (б) $U_0 = 9,2$ м/с и (в) $U_0 = 7,5$ м/с. Угол атаки $\alpha = 9^\circ$.

На рис.6 видно, 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 замедленного течения в обоих случаях смещена ближе к нижней поверхности тел, так как оба тела расположены не под нулевым углом атаки к набегающему потоку.

Для обоих тел обтекания в некоторой области течения, расположенной над их верхней поверхностью, локальная скорость становится выше U_0 (см. рис.6). При этом максимум скорости достигается примерно в поперечном сечении, имеющем минимальную площадь: для пластины – примерно над передней кромкой $U_0 = 12,75$ м/с, для профиля – несколько позади его лобовой точки $U_0 = 13,8$ м/с. Максимум скорости для случая безкавитационного обтекания профиля, представленного на рис.6 (в), достигает $U_0 = 12$ м/с. Поскольку перед телами течение можно считать безвихревым, то по закону

Бернулли в области максимальной скорости давление локально достигает своего минимума. Это согласуется с результатами по визуализации (см. рис.3): областям минимального давления соответствует положение кавитационных каверн.

Необходимо заметить, что как для пластины, так и для профиля в кавитационном режиме обтекания (см. рис.6 (а) и (б)) за сечением минимальной площади вблизи верхней поверхности расположена область, где локальная средняя скорость течения находится в диапазоне $0 < U/U_0 < 0,5$. Положения и размеры этих областей примерно совпадают с положениями и размерами кавитационных каверн (ср.

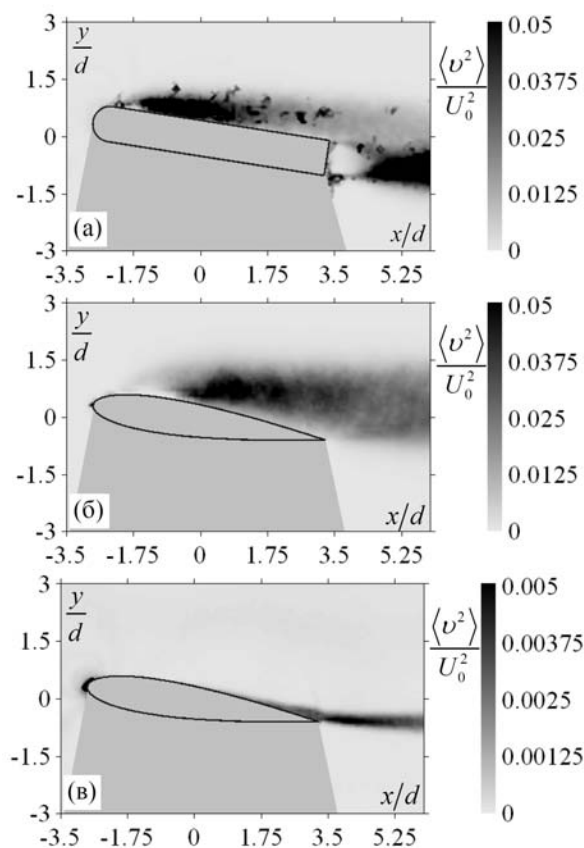


Рис.7. Пространственные распределения поперечной компоненты кинетической энергии турбулентности при обтекании (а) пластины при $U_0 = 7,5$ м/с и профиля NASA0015 при (б) $U_0 = 9,2$ м/с и (в) $U_0 = 7,5$ м/с. Угол атаки $\alpha = 9^\circ$.

рис.3 (а) и рис.6 (а), рис.3 (б) и рис.6 (б)). Таким образом, можно заключить, что наличие в потоке пузырей приводит к тому, что внутри образованных ими кавитационных каверн скорость течения минимальна. За передней кромкой верхней грани пластины и за лобовой точкой профиля образуется ярко выраженный сдвиговый слой (см. рис.6 (а) и (б)). Это приводит к генерации турбулентности в

этой области течения, и амплитуда пульсаций скорости возрастает (см. рис.7 (а) и (б)). Это также подтверждает рис.8 (а) и (б), на котором видны отдельные области с высокими значениями завихренности.

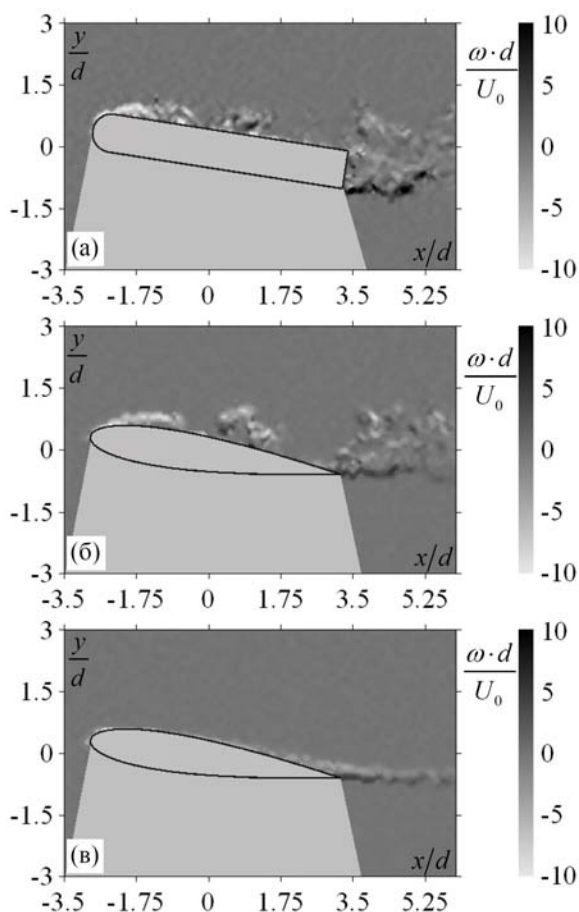


Рис.8. Мгновенные поля завихренности с наложенным на них полем скорости при обтекании (а) пластины при $U_0 = 7,5$ м/с и профиля **NACA0015** при (б) $U_0 = 9,2$ м/с и (в) $U_0 = 7,5$ м/с. Угол атаки $\alpha = 9^\circ$.

На рис.6 также можно видеть, что за телами как в условиях кавитации, так и в ее отсутствии образуется характерный след, скорость течения в котором меньше U_0 . Причем для пластины, вблизи ее заднего края продольная компонента средней скорости имеет отрицательные значения, т.е. локально

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с помощью методики PIV были измерены поля мгновенной скорости и завихренности при различных режимах обтекания модельных профилей: плоскопараллельной пластины с закругленным передним торцом и профиля **NACA0015**. Рассчитаны пространственные распределения

течение направлено к пластине, против основного потока. Это приводит к тому, что за пластиной вдоль направления потока существуют два параллельных сдвиговых слоя, которые затем сворачиваются в последовательность вихревых структур. Они имеют противоположное направление закрутки (см. рис.8 (а)): отрицательные значения для верхнего слоя – вращение по часовой стрелке, положительные значения для нижнего – вращение против часовой стрелки. На рис.7 (а) можно видеть, что на расстоянии примерно одного калибра от заднего края пластины и далее вниз по течению происходит интенсивная генерация турбулентности, где достигаются максимальные значения пульсаций скорости. Таким образом, за пластиной турбулентный след состоит из двух частей примерно одинаковой интенсивности: одна из них обусловлена развитием слоя смешения, образованного за передней кромкой пластины, а вторая возникает в результате отрыва потока. Наличие отрыва в потоке является неблагоприятным с точки зрения увеличения гидродинамического сопротивления.

Для профиля **NACA0015** по сравнению с пластиной при одинаковой скорости течения выраженного турбулентного следа не наблюдается (ср. рис.7 (а) и (в)), в силу того, что форма профиля является более обтекаемой. На рис.8 (в) можно видеть, что вихревой след за профилем представляет собой вихревую дорожку относительно слабой интенсивности. Дорожка состоит из двух видов вихрей, вращающихся в противоположные стороны, но имеющих примерно равную по модулю завихренность. Эти вихри зарождаются в двух пограничных слоях на верхней и нижней сторонах профиля.

Для кавитационного режима обтекания профиля интенсивность турбулентного следа значительно возрастает (примерно на порядок), а также существенно увеличивается его поперечный размер по сравнению со случаем без кавитации (ср. рис.6(б) и (в), рис.7 (б) и (в)). Кроме того, помимо вихревой дорожки также происходит зарождение вихрей и за лобовой точкой профиля (см. рис.8 (б)). Наиболее интенсивная генерация турбулентности происходит в слое смешения за лобовой точкой, тогда как интенсивность вихревой дорожки за задней кромкой профиля остается практически неизменной (см. рис.8 (б)). В следе за крылом происходит взаимодействие крупномасштабных вихревых структур с вихревой дорожкой.

средней скорости течений и кинетической энергии турбулентности. Был проведен анализ пространственной структуры кавитационных каверн и сравнение турбулентной структуры течений как для кавитационных, так и для докавитационных режимов обтекания. Показано, что кавитационная каверна

при обтекании профиля NASA0015 возникает на большей скорости и, соответственно, при больших числах Рейнольдса, чем при обтекании пластины. При этом за пластиной образуется более мощный турбулентный след. Таким образом, обтекание пластины является энергетически более затратным, чем обтекание профиля.

Обнаружено, что на режиме с развитой кавитацией гидродинамическая структура течения претерпевает существенные изменения по сравнению с безкавитационным обтеканием. На режиме с развитой кавитацией (за передней кромкой пластины и за

лобовой точкой профиля), где расположена кавитационная каверна средняя скорость течения достигает своих минимальных значений. При кавитационном режиме обтекания образуется мощный вихревой след вместо вихревой дорожки слабой интенсивности в докавитационном режиме. Кроме того, в кавитационном режиме за лобовой точкой профиля в слое смешения зарождаются и эволюционируют вниз по течению крупномасштабные вихревые структуры, этот процесс носит квазипериодический характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Callenaere, M., Franc, J.P., and Michel, J.M., 1998, "Influence of Cavity Thickness and Pressure Gradient on the Unsteady Behaviour of Partial Cavities", Proceedings of the 3rd International Symposium on Cavitation, Grenoble, France.
2. Franc, J.P., 2001, "Partial Cavity Instabilities and Re-Entrant Jet", Proceedings of CAV 2001—International Symposium on Cavitation, Pasadena, California.
3. Kato, H., Maeda, M., Kamono, H., and Yamaguchi, H., 1996, "Temperature Depression in Cavity", Proceedings of Fluids Engineering Division Conference, San Diego, USA.
4. Kawanami, Y., Kato, H., Yamaguchi, H., Tagaya, Y., and Tanimura, M., 1997, "Mechanism and Control of Cloud Cavitation", J. Fluids Eng., 119, pp. 788–795.
5. Keller, A.P., 2001, "Cavitation Scale Effects - Empirically Found Relations and the Correlation of Cavitation Number and Hydrodynamic Coefficients", Proceedings of CAV 2001—International Symposium on Cavitation, Pasadena, California.
6. Sakoda, M., Yakushiji, R., Maeda, M., and Yamaguchi, H., 2001, "Mechanism of Cloud Cavitation Generation on a 2-D Hydrofoil", Proceedings of CAV 2001—Int. Symposium on Cavitation, Pasadena, California.