

*Двенадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 25 — 28 июня 2013 г.*

УДК 532.528 + 532.574.7 + 532.582

А.Ю. Кравцова, К.С. Первунин, М.В. Тимошевский

*Институт теплофизики СО РАН, Россия, 630090, Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 1
Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2
E-mail: pervunin@itp.nsc.ru*

**ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ
ВБЛИЗИ КАВИТИРУЮЩЕЙ ПЛАСТИНЫ С ЗАКРУГЛЕННОЙ НОСОВОЙ
ЧАСТЬЮ И ГИДРОКРЫЛА НАСА0015**

АННОТАЦИЯ

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению кавитирующих течений вблизи двумерных гидрокрыльев с применением методов высокоскоростной визуализации и цифровой трассерной визуализации. Исследования проводились для двух тел обтекания: пластины с закругленной носовой и срезанной кормовой частями и гидрокрыла НАСА0015 с одинаковыми длинами хорды при углах атаки от 0 до 9 градусов. В результате вариации числа кавитации были зарегистрированы различные типы кавитационных каверн, общие для обоих тел, а также некоторые отличительные особенности. При малых углах атаки (не более 3°) кавитация на пластине возникает в виде массива стриков ("пузырьковая кайма"), тогда как в случае с гидрокрылом – в форме отдельных пузырей, перемещающихся вниз по течению. На развитых кавитационных режимах при обтекании гидрокрыла разрозненные и прерывистые пузырьковые стрики, в которые превращаются одиночные пузыри при уменьшении числа кавитации, растут вниз по течению и затем сливаются в большие по размерам пузырьковые облака, формируя регулярную сеточную структуру. Однако при увеличении угла атаки до 9° пространственная структура каверны на гидрокрыле преобразуется в стриковую, как в случае пластины при малых углах атаки. При этом увеличение угла атаки пластины не приводит к значительным изменениям в структуре кавитационной каверны.

Использование метода PIV позволило измерить поля мгновенной скорости течения вблизи исследуемых тел, по которым были рассчитаны пространственные распределения средней скорости и статистических моментов турбулентных пульсаций скорости. В результате было показано, что возникновение кавитации обусловлено развитием течения жидкости вблизи передней кромки тел, однако в дальнейшем картина течения сильно зависит от типа каверны, существенно отличаясь от докавитационного режима.

**ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ, PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY,
ПЛАСТИНА, ГИДРОКРЫЛО НАСА0015, ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА И
ДИНАМИКА КАВИТАЦИОННЫХ КАВЕРН, ТУРБУЛЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ТЕЧЕНИЙ**

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы, связанные с кавитацией и кавитационной эрозией, принадлежат к наиболее трудным фундаментальным задачам современной гидродинамики. 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 (КВС) и кавитация. Взаимодействие КВС с парогазовой дисперсной фазой является сложным нелинейным процессом, оказывающим существенное влияние на кавитационную эрозию элементов гидроагрегатов и на пульсационные характеристики течения вследствие взаимного влияния непрерывной фазы и частиц дисперсной фазы. На траектории частиц влияет локальная неравновесная турбулентность жидкости (турбулентная дисперсия), при этом движение пузырей оказывает существенное влияние на турбулентную структуру потока (модуляция турбулентности). Как известно, возникновение резонансных эффектов может приводить к чрезмерным вибрационным нагрузкам и, как следствие, выходу из строя гидроагрегатов или в худшем случае даже авариям и катастрофам. Кавитационная эрозия, в свою очередь, является одним из механизмов интенсивного износа рабочих колес гидротурбин и насосного оборудования, что существенно снижает их ресурс работы и увеличивает затраты на производство или потребление энергии. Как правило, кавитационной эрозии подвергаются определенные участки тыльных сторон лопаток, втулок и ободов рабочих колес, при этом остальная поверхность остается неповрежденной. Это обуславливается определяющей ролью пространственной структуры двухфазного течения на процесс кавитационной эрозии. Таким образом, становится очевидным, что одновременное исследование динамики кавитационных каверн и КВС в нестационарных турбулентных течениях, реализующихся в элементах гидроагрегатов, распределений турбулентных характеристик, а также изучение взаимодействия КВС, развивающихся в сдвиговых слоях в жидкости, с парогазовой фазой являются крайне актуальными задачами с точки зрения совершенствования конструкций современного гидротехнического оборудования.

Сегодня в мировой литературе можно найти достаточно много экспериментальных работ, посвященных исследованию кавитирующих течений вблизи двумерных гидрокрыльев, из анализа которых известно, что все типы кавитационных каверн делятся на два основных класса: неполные или частичные каверны и суперкаверны (подробное описание можно найти, например, в работе [1]). В этой работе авторы также показали существенное влияние неблагоприятного градиента давления на формирование турбулентного следа. Исследованию облачной кавитации также посвящено относительно большое количество экспериментальных работ. Авторы работы [2] показали, что облачная каверна состоит из крупномасштабного вихря, в центре которого сосредоточены кавитационные пузыри, заполненные парогазовой смесью. Во многих экспериментах (например [3]) было обнаружено, что колебания кавитационных каверн происходят при близких значениях числа Струхала. Дальнейшие исследования доказали, что существует корреляция между отрывом кавитационных каверн и формированием возвратного течения в области замыкания каверны как результата действия обратного градиента давления (см. [4] и [5]). Также существуют исследования, направленные на изучение влияния локального объемного содержания паровой фазы в пределах каверны и в следе, температуры жидкости и других параметров течений на структуру и динамику кавитационных каверн (для более подробного ознакомления см. [5 – 7]). Однако основные результаты в перечисленных работах представляют собой визуальные наблюдения, режимные карты с качественным описанием, точечные измерения давления и скорости ([1] и [8]).

Таким образом, несмотря на большое количество работ по исследованию кавитирующих течений, до сих пор детальная информация, необходимая для оптимизации существующих математических моделей, крайне ограничена даже для упрощенных условий.

С точки зрения развития и совершенствования современных численных методов, описывающих возникновение и развитие кавитации, основной интерес представляют исследования в канонических геометрических условиях (сопла Вентури, модельные профили, например крылья серий НАСА, и т.п.) В связи с этим, получение систематической экспериментальной информации для различных кавитационных режимов обтекания модельных объектов крайне важно.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию пространственной структуры кавитационных каверн и их динамики на различных режимах кавитационного обтекания модельных гидропрофилей, а также измерению распределений средних и турбулентных характеристик течений вблизи тел путем применения современных оптических методов диагностики двухфазных потоков.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

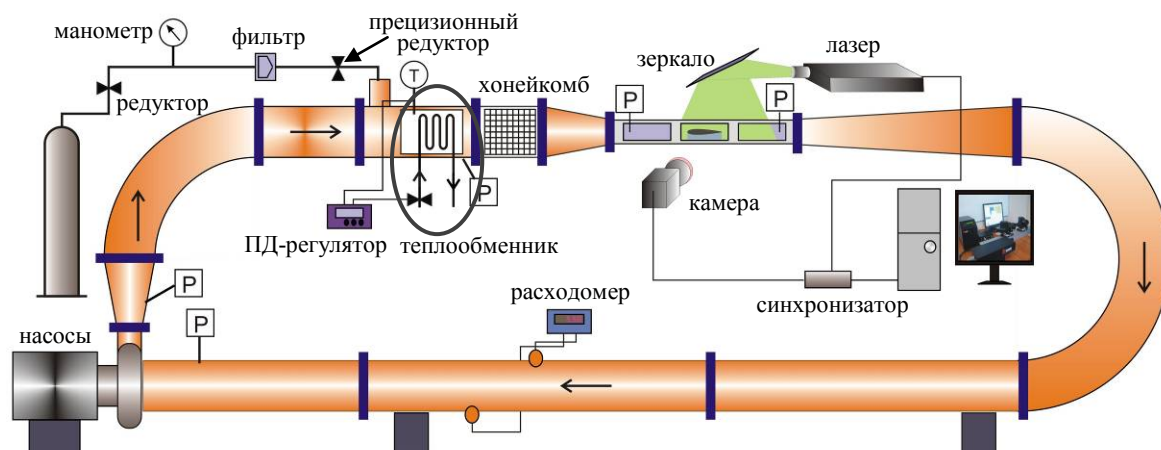


Рис. 1. Схема гидродинамического кавитационного стенда ИТ СО РАН, где Р – датчик давления, Т – датчик температуры

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 (см. 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 $3,5^\circ$ 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 $1100 \text{ м}^3/\text{ч}$, что соответствует максимальной скорости течения в пустом канале (без тела обтекания) $15,3 \text{ м/с}$.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве модельных тел обтекания были выбраны пластина с закругленной носовой частью и гидрокрыло NASA0015. Длины хорд обоих тел составляли 100 мм, толщина пластины – 15 мм. Модельные гидропрофили были изготовлены из латуни и имели сравнительно высокий уровень шероховатости поверхности – около 2,5 мкм.

В экспериментах угол атаки тел α принимал четыре значения 0, 3, 6 и 9°. Рабочей жидкостью служила дистиллированная вода. Деаэрация воды с целью уменьшения количества растворенного в воде воздуха не проводилась. Количество растворенного воздуха оценивалось по закону Генри при нормальных условиях и составляло приблизительно 0,023 г воздуха на 1 кг воды. Температура воды поддерживалась постоянной на уровне 30°C. Избыточное давление в контуре установки было фиксировано на уровне 59 кПа. В ходе экспериментов для достижения различных условий вблизи тел и, следовательно, различных типов кавитационного обтекания варьировалось число кавитации $\sigma = (P_{ex} - P_{ne})/(\rho \cdot U_0^2/2)$, определяемое разницей статического давления на входе в рабочем канале и давлением насыщенных паров воды, отнесенной к напору потока, в пределах от 0,6 до 6 за счет изменения среднерасходной скорости потока U_0 . При данных условиях $P_{ne} = 0,044$ бар. Начальный уровень турбулентных пульсаций скорости течения u_{rms}/U_0 был менее 1%. Число Рейнольдса Re , рассчитанное по среднерасходной скорости течения в рабочем канале U_0 и хорде тел обтекания C , находилось в пределах $0,9 \div 2 \cdot 10^6$. Число Струхала $St = f \cdot L_C / U_0$, определяемое как отношение произведения максимальной длины каверны L_C и характерной частоты отрыва кавитационной каверны f для данного режима к среднерасходной скорости течения U_0 , было около 0,4 для пластины и 0,16 для гидрокрыла NASA0015.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Мгновенная скорость течения измерялась с помощью измерительного комплекса «ПОЛИС», состоящего из двойного импульсного АИГ:Nd 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), снабженной объективом Nikon AF Nikkor 50 mm f/1.4D и оптическим низкочастотным фильтром (край полосы пропускания на 570 нм), а также синхронизатора. Управление измерительным комплексом «ПОЛИС» осуществлялось через компьютер посредством программного пакета «ActualFlow». Толщина лазерного "ножа", сформированного цилиндрической линзой, в методе Particle Image Velocimetry (PIV) составляла примерно 0,8 мм в измерительной плоскости, которая в экспериментах совпадала с серединным продольным сечением рабочего канала. Расстояние между камерой и лазерным "ножом" составляло около 527 мм. Размер измерительной области составлял приблизительно 124×124 мм. Для корректного измерения полей мгновенной скорости методом PIV в кавитирующих потоках в экспериментах в рабочую жидкость добавлялись флуоресцентные трассеры (средний размер 10 мкм, диапазон длин волн излучения 550-700 нм).

Для улучшения качества данных перед расчетом полей скорости из первого и второго кадра каждого исходного изображения вычиталось среднее по полному набору изображений поле интенсивности. Эта процедура позволяет скомпенсировать неоднородность засветки изображения независимо для первого и второго кадров, а также избавиться от бликов и теней (см. Рис. 2-а, б). В результате интенсивность засветки первого и второго кадров становится примерно одинаковой, что позволяет существенно повысить точность вычисления векторов скорости на последующем этапе обработки данных. Дополнительно перед расчетом полей скорости изображения маскировались для того, чтобы избавиться от "неверных" векторов в той области изображений, которая соответствует положению гидрокрыла и теней (Рис. 2-в).

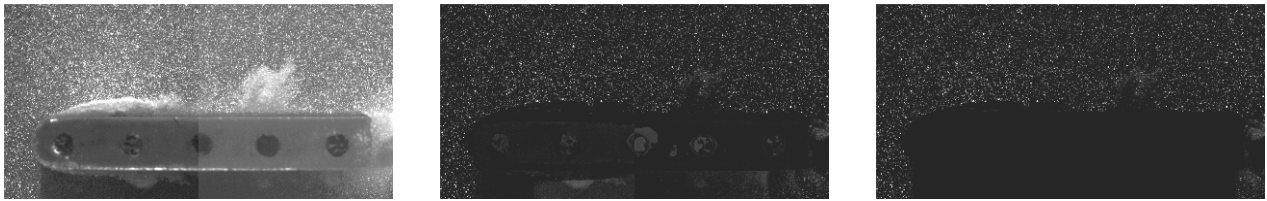


Рис. 2. Подготовка исходных изображений к расчету полей скорости: (а) исходная фотография, (б) поле интенсивности после вычета среднего по всем изображениям и (в) замаскированное поле интенсивности

Поля мгновенной скорости рассчитывались с помощью итерационного кросскорреляционного алгоритма с непрерывным смещением и деформацией элементарных расчетных ячеек. Перекрытием расчетных областей составляло 75%. Подпиксельная интерполяция кросскорреляционного пика осуществлялась по трем точкам с использованием одномерной аппроксимации функцией Гаусса. Для того чтобы иметь относительно большой динамический диапазон начальный размер элементарной расчетной области составлял 64×64 пикселей. Размер конечной расчетной области был 8×8 пикселей, чтобы иметь относительно низкий уровень шума. Погрешность определения смещения не превышала 0,1 пикселя, так что ошибки измерения скорости составляли 1% и 4% при смещении трассеров на 8 и 2 пикселя соответственно. Также при расчете векторов скорости учитывалась концентрация частиц в элементарной расчетной ячейке, что позволяет производить валидацию векторов сразу на первом этапе вычислений. Полученные векторные поля мгновенной скорости подвергались нескольким этапам валидации (см. Рис. 3). На первом этапе применялся фильтр по соотношению сигнал/шум с коэффициентом 2 (Рис. 3-б). Далее применялся адаптивный медианный фильтр по области 7×7 пикселей (Рис. 3-в). На последнем, третьем этапе использовалась новая предложенная авторами настоящей работы процедура кластерной валидации векторов, описание которой дано в следующем абзаце, с порогом 50 (Рис. 3-г). Как можно видеть, итоговое поле не содержит заведомо "ложных" векторов. В областях течения, затененных каверной, векторов скорости нет, как и следовало ожидать, поскольку в этих областях трассеры не видны.

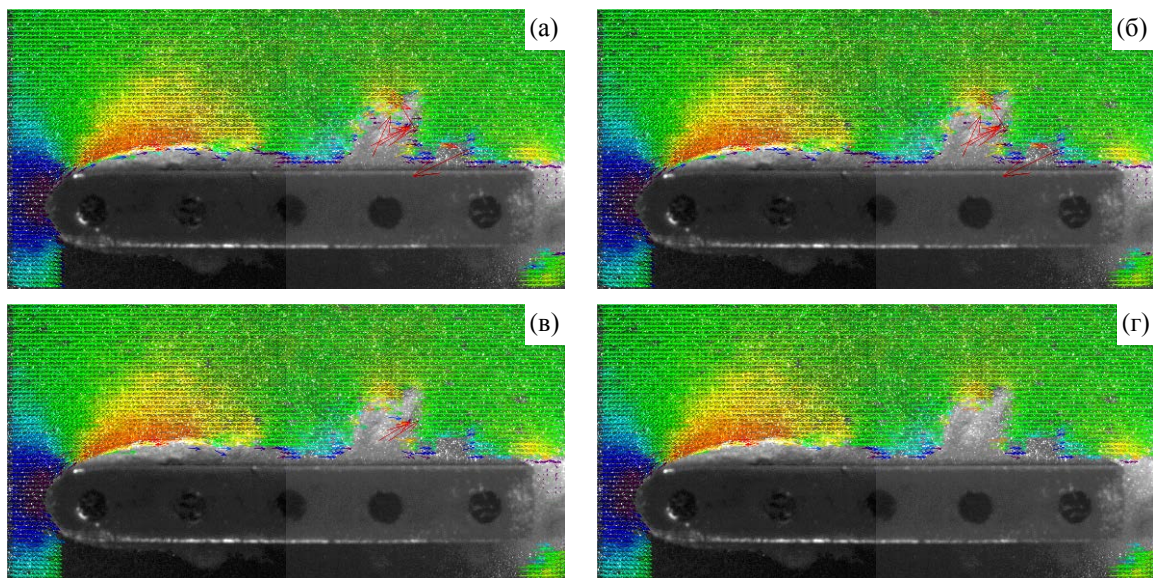


Рис. 3. Векторные поля скорости, наложенные на исходное изображение, на различных этапах валидации данных: (а) итерационный кросскорреляционный алгоритм, (б) фильтрация по соотношению сигнал/шум, (в) адаптивный медианный фильтр и (г) кластерная валидация. Обтекание пластины при $\alpha = 0^\circ$, $\sigma = 1,05$ (облачная кавитация). Показан каждый четвертый вектор

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.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ниже представлены результаты визуализации и измерений скорости течений только для угла атаки $\alpha = 3^\circ$. Этот угол атаки был выбран как наиболее демонстративный для описания характерных особенностей кавитирующих течений. На всех приведенных графиках и полях точка начала координат совпадает с передней кромкой гидрокрыла в измерительной плоскости при $\alpha = 0^\circ$.

Визуализация

На Рис. 4 представлены характерные типы кавитационных каверн, возникающих со стороны разрежения на поверхности пластины и гидрокрыла. При кавитационном обтекании пластины каверна начинает зарождаться при числах кавитации около $\sigma \approx 2,78$ в виде пузырьковой "каймы" – однородно распределенный массив стриков, заполненных пузырями. Данный режим отличается от обычной присоединенной пленочной каверны¹ и сохраняется вплоть до приблизительно $\sigma = 2,26$ (см. Рис. 4-а.1). Длина каверны достигает $L_c/C = 0,07$. Похожие стрики были зарегистрированы в работе [9]. Характерное расстояние между стриками составляет примерно 1 мм или 1% от длины пластины. Появление пузырьковой "каймы" вместо пленочной каверны, как можно полагать, объясняется как относительно высоким уровнем шероховатости поверхности гидрокрыльев, так и относительно большим (в сравнении с деаэрированной водой) количеством растворенного в воде воздуха. Очевидно, что чем выше шероховатость, тем раньше (при больших числах кавитации и меньших числах Рейнольдса) произойдет переход к турбулентности пограничного слоя и, следовательно, тем больше газопаровой фазы будет захвачено вихрями при прочих равных условиях. Вследствие большого количества растворенного воздуха локальное газосодержание внутри каверны существенно выше, чем было бы в случае деаэрированной воды.

Как известно, уменьшение числа кавитации приводит к увеличению продольного размера каверны и переходу к другому режиму кавитационного обтекания после преодоления некоторого порогового значения. Когда число кавитации уменьшается до $\sigma =$

¹ Пленочная каверна представляет собой парогазовую пленку относительно постоянной длины с отчетливой межфазной границей. В области замыкания каверны основной поток заново присоединяется к твердой поверхности кавитирующего тела.

1,7, каверна является переходной². Как можно видеть на Рис. 4-а.2, на данном режиме пространственная структура каверны становится в существенной степени трехмерной. Стрики становятся толще и начинают взаимодействовать и сливаться, формируя присоединенную стриково-пленочную каверну. Здесь стоит заметить, что каверна имеет "пенную" межфазную поверхность, и в отличие от результатов работ других авторов, представленных в литературе (например, [10]), в настоящей работе в области замыкания каверны были зарегистрированы отрывы относительно малых (около 0,1-0,2С) кластеров пузырей. Длина каверны возрастает до $L_c/C = 0,23$. Вниз по течению увеличение локального давления влечет схлопывание микропузырей и, как следствие, падению концентрации дисперсной фазы.

Дальнейшее уменьшение числа кавитации влечет за собой переход к облачному режиму³ кавитационного обтекания (см. Рис. 4-а.3 и 4-а.4). Как ранее было показано во многих работах, отрыв каверны сопровождается возникновением циркуляции жидкости, что в результате приводит к формированию крупномасштабного вихря вокруг облачной каверны. Характерные значения числа Струхалия для режимов облачной кавитации даны в подписи к Рис. 4. При $\sigma = 1,14$ размер присоединенной каверны увеличивается до $L_c/C = 1,1$, также как и размер оторвавшихся облаков. Кроме того, вниз по течению за пластиной можно наблюдать тонкие продольные и поперечные структуры, заполненные воздухом и паром. Их возникновение, как можно предполагать, связано с генерацией мощных вихрей за задней кромкой пластины. Внутри этих вихревых жгутов локальное давление падает ниже давления насыщенных паров, что приводит к парообразованию.

В случае гидрокрыла НАСА0015 картина обтекания существенно отличается. Сначала, когда $\sigma = 1,14$, появляются отдельные микроскопические пузырьки на расстоянии приблизительно 0,03С от передней кромки гидрокрыла (Рис. 4-б.1). Эти пузыри постепенно движутся вниз по потоку со скоростью около 17,08 м/с, что очень близко к локальной скорости течения. Размер пузырей также увеличивается со скоростью примерно 5,8 м/с. Такая динамика роста и движения пузырей наблюдается до тех пор, пока пузыри не достигают некоторой пороговой линии, расположенной на расстоянии 0,27С (для центрального сечения) от передней кромки гидрокрыла. После чего, пузыри схлопываются (см. Рис. 4-б.1). Как можно ожидать, на этой пороговой линии локальное давление возрастает до такого уровня, которого достаточно для схлопывания пузырей. Данный режим называется пузырьковой кавитацией. На данном режиме каверна еще не сформирована. Когда число кавитации становится меньше (см. Рис. 4-б.2 и 4-б.3), имеет место переходный тип кавитационного обтекания. Как и в предыдущем случае, микропузырьки появляются практически сразу за передней кромкой гидрокрыла и распространяются примерно до его середины. Размер пузырей изменяется в пределах от нуля до 0,13С. В данном случае каверну уже можно рассматривать как сформировавшуюся, однако ее переднюю кромку определить практически невозможно. Задняя кромка каверны является "пенистой". В области замыкания пузыри схлопываются, образуя подковообразные облака немного ниже по течению. Эти облака, вероятно, находятся в центрах вихревых структур и повторяют их форму. Когда $\sigma = 0,9$, наблюдается облачный режим обтекания. Однако, как и в случае с переходным режимом, помимо крупномасштабных облачных каверн можно наблюдать подковообразные облака. При этом числа Струхалия в случае гидрокрыла НАСА0015 в два-три раза меньше, чем в случае с пластиной.

² Данный тип каверны является промежуточным между пленочным и облачным. На данном режиме кавитационного обтекания в области замыкания каверны непрерывно происходит отрыв относительно малых и больших по размеру подковообразных облаков, заполненных парогазовыми микропузырьками, в различных местах каверны.

³ Уже является общепризнанным тот факт, что облачный тип кавитационного обтекания характеризуется отрывом всей каверны от поверхности гидрокрыла. Этот процесс является узавизипериодическим вследствие возникновения возвратного течения под присоединенной каверной. Более подробное описание облачной кавитации можно найти, например, в [4].

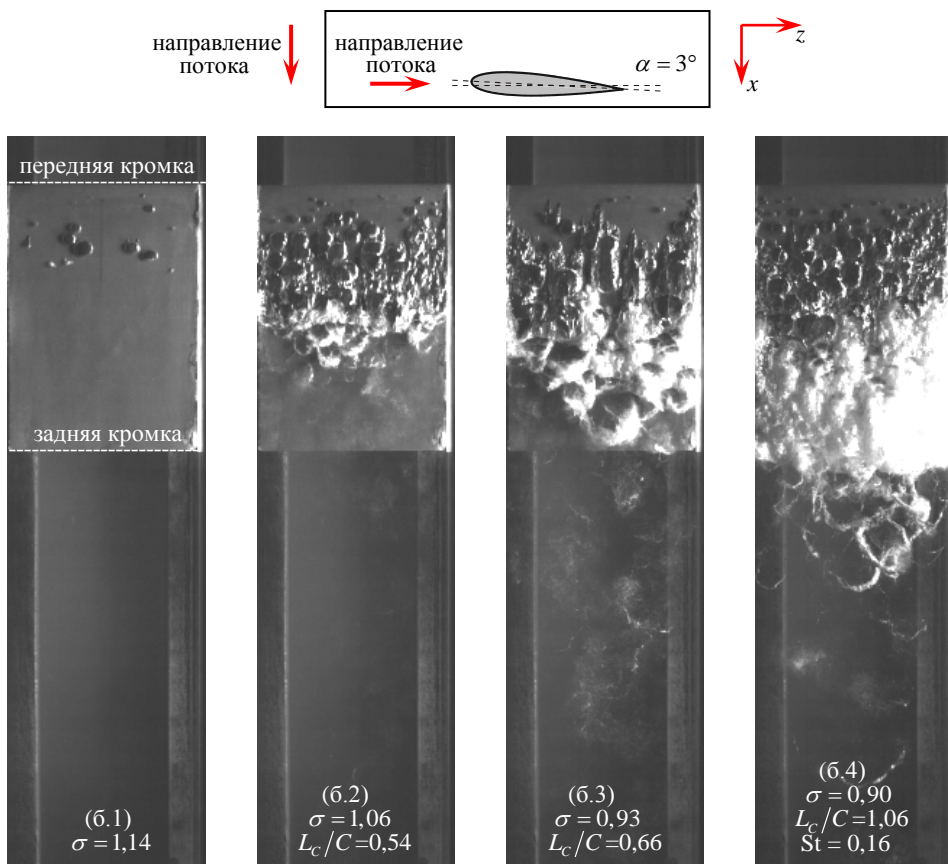
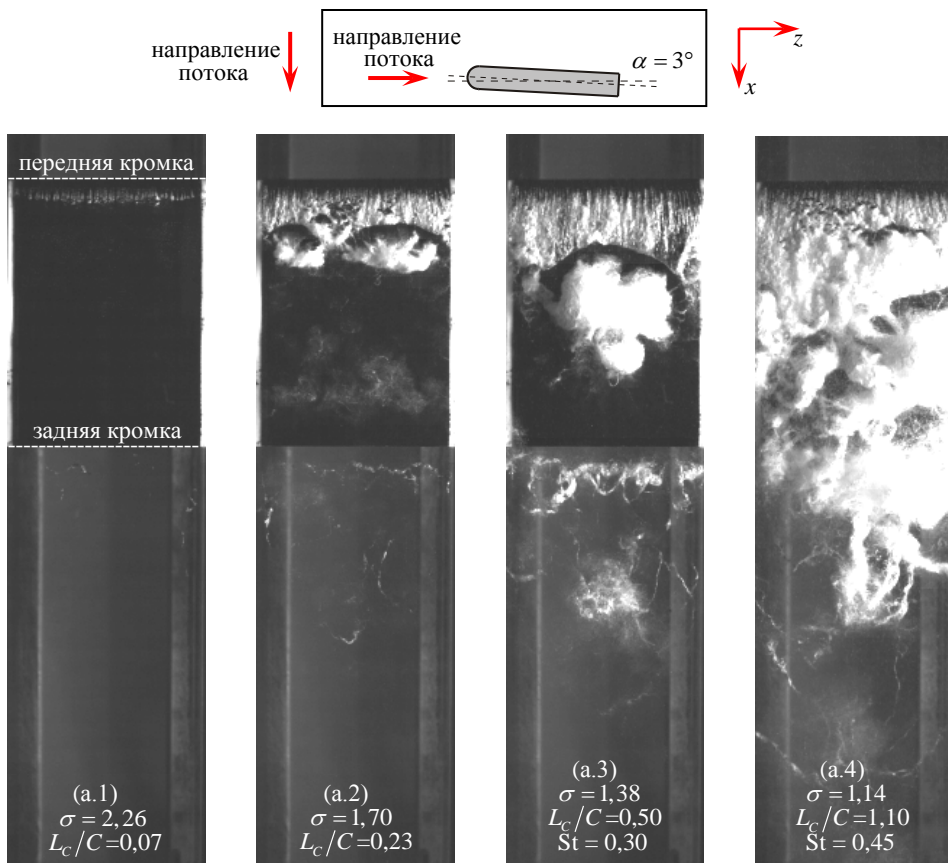


Рис. 4. Мгновенные фотографии кавитационных каверн (вид сверху), возникающих при обтекании (а) пластины с закругленной носовой частью (б) гидропрофиля NACA0015

Распределения скорости течений

На основе измеренного ансамбля, состоящего из 5000 мгновенных полей 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 для обоих гидропрофилей на трех характерных режимах обтекания. Верхние изображения для обоих случаев (Рис. 5-а.1 и 5-б.1) соответствуют докавитационному режиму обтекания⁴, средние (Рис. 5-а.2 и 5-б.2) – стриковой или пленочной 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 $\sigma = 2,98$ максимальная скорость $U_{\max}/U_0 \approx 1,51$ в точке $x/C = 0,10$ и $y/C = 0,11$, тогда как для гидрокрыла НАСА0015 при начальном $\sigma = 1,57$ $U_{\max}/U_0 \approx 1,34$ 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. 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). Вблизи задней кромки пластины $x/C = 1,0$ можно видеть появление области, где достигается умеренный максимум скорости вследствие исчезновения пристенного сдвига вблизи кромки, на которой происходит отрыв потока.

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

⁴ Следует отметить, что на данном режиме обтекания интенсивное парообразование сохраняется в центрах вихревых структур, генерируемых в следе за пластиной. В данном случае рассматривается только область за передними кромками обоих тел обтекания.

приводят к генерации интенсивных флуктуаций скорости, которые распространяются существенно дальше от поверхности гидропрофилей.

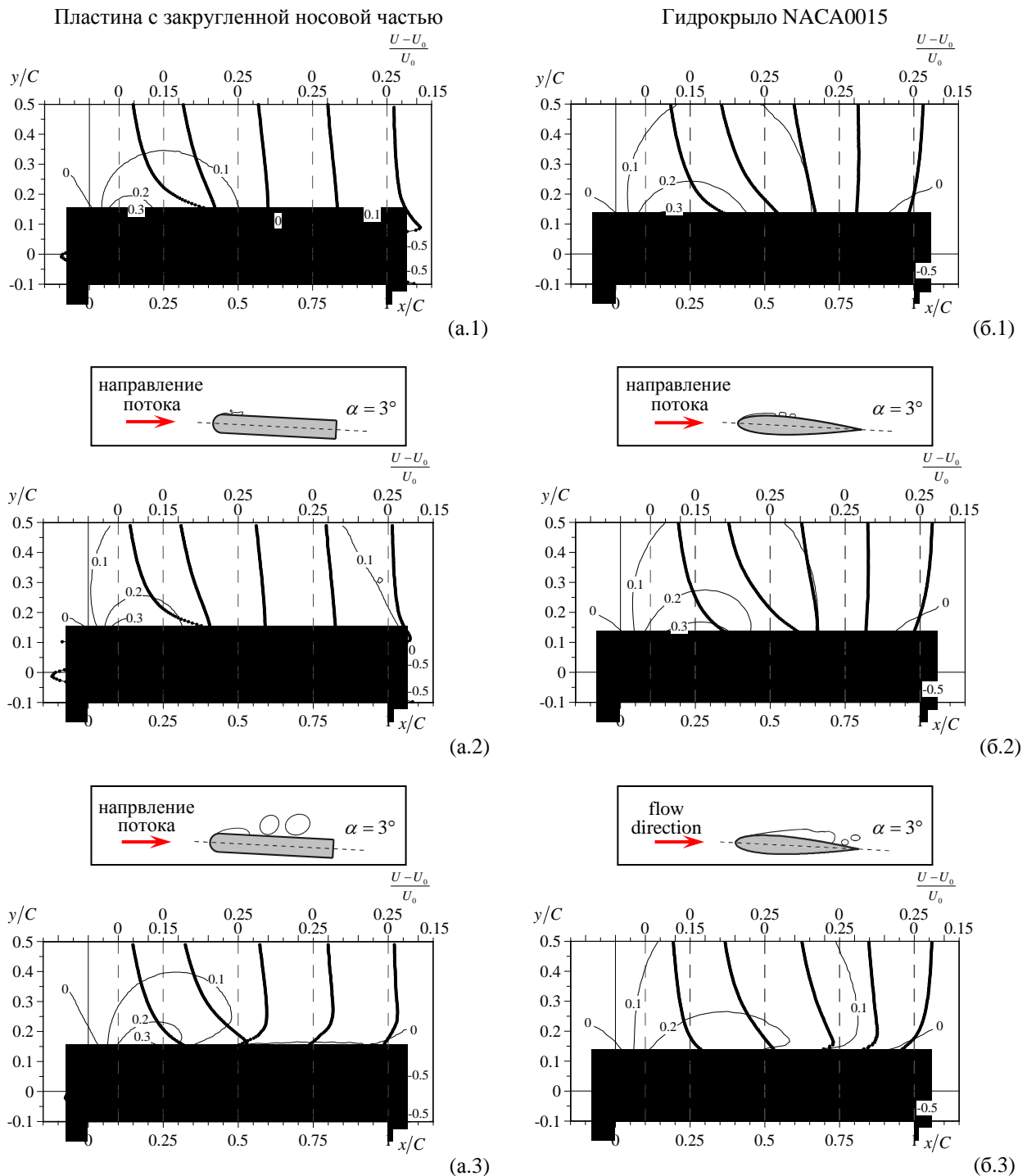


Рис. 5. Эволюция продольной компоненты средней скорости вниз по течению в сравнении с U_0 при обтекании (а) пластины, когда (а.1) $\sigma = 2,98$ (докавитационный режим), (а.2) $\sigma = 2,26$, $L_c/C = 0,07$ (стриктовая кавитация), (а.3) $\sigma = 1,56$, $L_c/C = 0,3$, $St = 0,44$ (облачная кавитация) и (б) гидрокрыла NACA0015, когда (б.1) $\sigma = 1,57$ (докавитационный режим), (б.2) $\sigma = 1,14$ (пузырьковая кавитация), (б.3) $\sigma = 0,93$, $L_c/C = 0,66$ (переходный режим)

В целом уменьшение числа кавитации приводит к росту флуктуаций скорости. В случае пластины этот эффект сначала выражен слабо: нет практически никакой разницы в распределениях, представленных на Рис. 6-а1 и а.2. В обоих случаях максимум пульсаций скорости $\dot{y}/U_0 \approx 0,23$ и расположен в точке $x/C = 0,1$ и $y/C = 0,13$. В случае облачной кавитации (Рис. 6-а.3) турбулентные пульсации скорости распространяются широким

фронтом вниз по потоку сразу с передней кромки пластины. Максимум пульсаций скорости $\ddot{y}/U_0 \approx 0,4$ достигается в точке $(0,2; 0,11)$.

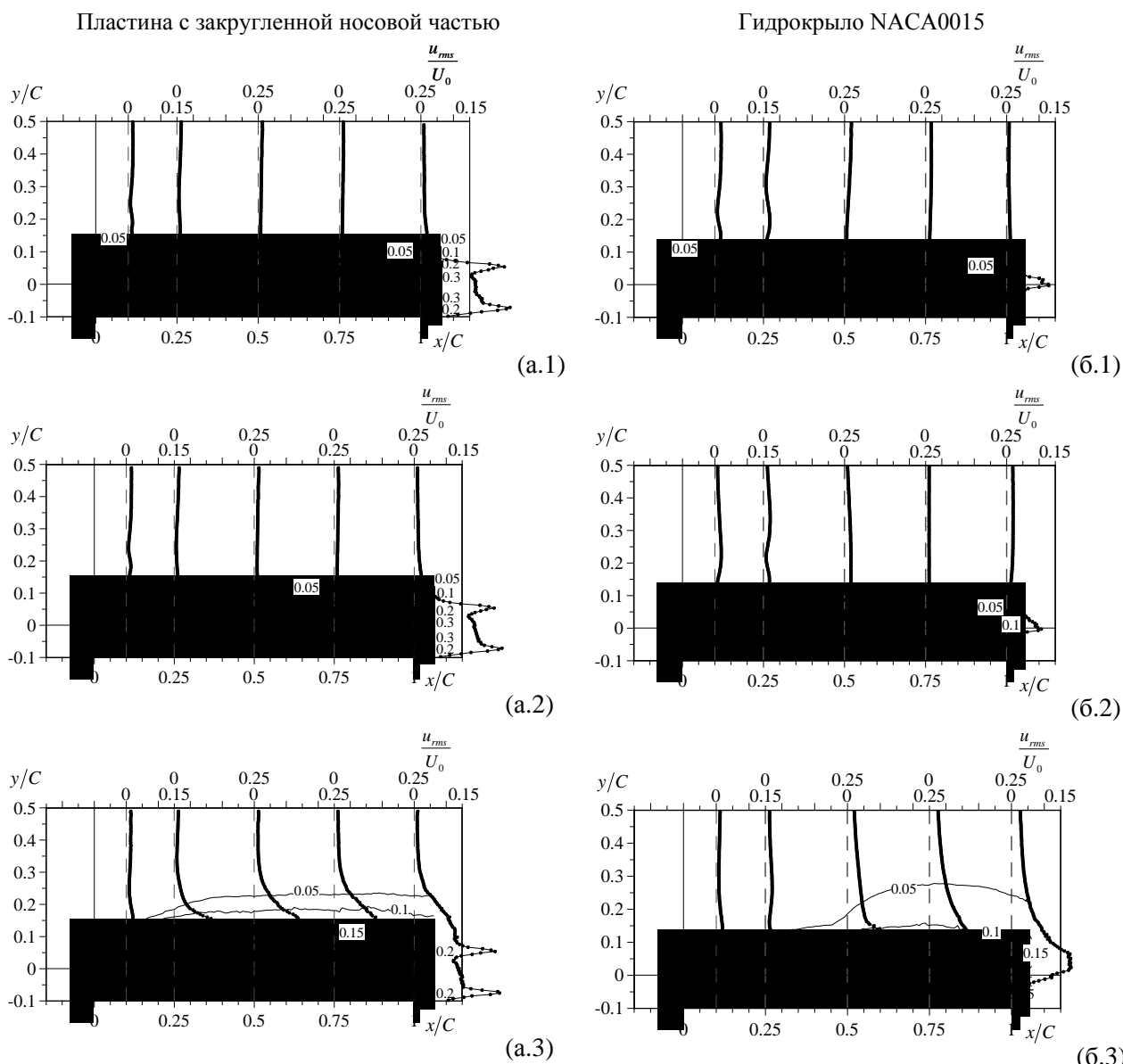


Рис. 6. Эволюция пульсационной составляющей продольной компоненты скорости (среднеквадратичные значения) вниз по течению при обтекании (а) пластины, когда (а.1) $\sigma = 2,98$ (докавитационный режим), (а.2) $\sigma = 2,26$, $L_c/C = 0,07$ (стриктовая кавитация), (а.3) $\sigma = 1,56$, $L_c/C = 0,3$, $St = 0,44$ (облачная кавитация) и (б) гидрокрыла NACA0015, когда (б.1) $\sigma = 1,57$ (докавитационный режим), (б.2) $\sigma = 1,14$ (пузырьковая кавитация), (б.3) $\sigma = 0,93$, $L_c/C = 0,66$ (переходный режим)

Качественно похожая картина наблюдается в случае гидрокрыла NACA0015, хотя максимумы турбулентных флуктуаций, возникающих в тонком пограничном слое на поверхности гидропрофиля, меньше, чем в случае пластины. В случае пузырьковой кавитации наблюдается несколько больший уровень турбулентных пульсаций по сравнению с докавитационным режимом в особенности вблизи задней кромки, предположительно за счет влияния кавитации. Самые большие значения турбулентных пульсаций для всех чисел кавитации достигаются за задней кромкой (Рис. 6-б.3). Как и в случае с пластиной, на развитом кавитационном режиме можно наблюдать генерацию турбулентных пульсаций, которые распространяются в сторону от поверхности до примерно $y/C = 0,3$ (Рис. 6-б.3).

Таким образом, можно заключить, что переход к развитым кавитационным режимам приводит к существенной модификации турбулентной структуры всего потока. Как можно

видеть \tilde{u}/U_0 возрастает приблизительно в три раза в случае гидрокрыла НАСА0015, а точка, в которой достигается максимум флуктуаций скорости, смещается вниз по потоку.

ВЫВОДЫ

В работе проведен анализ визуальных данных и PIV измерений полей скорости и флуктуаций скорости течений вблизи плоской пластины с закругленной носовой частью и гидрокрыла НАСА0015 при угле атаки 3° для нескольких чисел кавитации, соответствующим различным режимам кавитационного обтекания.

Несмотря на сходство размеров и форм обоих тел обтекания, пространственные структуры кавитационных каверн существенно отличаются. На пластине кавитация возникает в виде пузырьковой "каймы", что вероятно обусловлено неустойчивостью течения, переходом к турбулентности и формированием пристенных вихревых стриков по направлению течения. С уменьшением числа кавитации стрики сливаются и превращаются в облака, которые отрываются ниже по течению. В случае гидрокрыла НАСА0015 кавитация возникает в виде отдельных пузырьков, которые при уменьшении числа кавитации коалесцируют, формируя кластеры больших по размеру пузырей. Перед схлопыванием в облако формирование пузырей впоследствии принимает крайне регулярную сеточную структуру.

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 (рост примерно в три раза) 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.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-08-01411-а), Правительства Российской Федерации (грант № 11.G34.31.0046, ведущий ученый – К. Ханьялич, ГОУ ВПО «Новосибирский государственный университет») и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (соглашение № 14.132.21.1725).

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

α – угол атаки, $^\circ$

C – длина хорды модельных гидрокрыльев, м

L_C – длина кавитационной каверны, м

U_0 – среднерасходная скорости жидкости, м/с

u_{rms} – пульсационная составляющая продольной компоненты скорости жидкости (среднеквадратичные значения), м/с

P_{ex} – статическое давление на входе рабочего канала, Па

P_{nv} – давление насыщенных паров воды, Па

ρ – плотность жидкости, кг/м³

ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с

f – характерная частота отрыва кавитационной каверны, 1/с

$\sigma = (P_{ex} - P_{nv})/(\rho \cdot U_0^2/2)$ – число кавитации

$Re = U_0 \cdot C/\nu$ – число Рейнольдса

$St = f \cdot L_C/U_0$ – число Струхалия

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Laberteaux K.R., Ceccio S.L.** Partial cavity flows. Part 1. Cavities forming on models without spanwise variation // J. Fluid Mech. 2001. Vol. 431. P. 1 – 41.
2. **Kubota A., Kato H., Yamaguchi H., Maeda M.** Unsteady structure measurement of cloud cavitation on a foil section using conditional sampling technique // J. Fluids Eng. 1989. Vol. 111. P. 204 – 210.
3. **George D.L., Iyer C.O., Ceccio S.L.** Measurement of the bubbly flow beneath partial attached cavities using electrical impedance probes // J. Fluids Eng. 2000. Vol. 122. P. 151 – 155.
4. **Callenaere M., Franc J.-P., Michel J.-M., Riondet M.** The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet // J. Fluid Mech. 2001. Vol. 444. P. 223 – 256.
5. **Kawakami D.T., Fuji A., Tsujimoto Y., Arndt R.E.A.** An assessment of the influence of environmental factors on cavitation instabilities // J. Fluids Eng. 2008. Vol. 130. P. (031303)-8.
6. **Cervone A., Bramanti C., Rapposelli E., d'Agostino L.** Thermal cavitation experiments on a NACA 0015 hydrofoil // J. Fluids Eng. 2006. Vol. 128. P. 326 – 331.
7. **Coutier-Delgosha O., Stutz B., Vabre A., Legoupil S.** Analysis of cavitating flow structure by experimental and numerical investigations // J. Fluid Mech. 2007. Vol. 578. P. 171 – 222.
8. **Leroux J.-B., Coutier-Delgosha O., Astolfi J.A.** A joint experimental and numerical study of mechanisms associated to instability of partial cavitation on two-dimensional hydrofoil // Phys. Fluids. 2005. Vol. 17. № 5. P. (052101)-20.
9. **Brandner P.A., Walker G.J., Niekamp P.N., Anderson B.** An experimental investigation of cloud cavitation about a sphere // J. Fluid Mech. 2010. Vol. 656. P. 147 – 176.
10. **Franc J.P., Michel J.M.** Attached cavitation and the boundary layer: experimental investigation and numerical treatment // J. Fluid Mech. 1985. Vol. 154. P. 63 – 90.

A.Yu. Kravtsova, K.S. Pervunin, M.V. Timoshevskiy

*Institute of Thermophysics, SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrentyev Ave., 1
Novosibirsk State University, Russia, 630090, Novosibirsk, Pirogova Str., 2
E-mail: pervunin@itp.nsc.ru*

HIGH-SPEED IMAGING AND VELOCITY FIELD MEASUREMENT ABOUT CAVITATING PLATE WITH ROUNDED NOSE AND NACA0015 HYDROFOIL

ABSTRACT

The paper reports on high-speed imaging and PIV study of cavitating flows around a flat plate with semi-circular leading edge and sharp-cut end, and a NACA0015 hydrofoil. Both test foils were investigated at a series of attack angles ranging from 0 to 9 degrees with varying cavitation number. Several known types of cavitation common to both foils, but also some different patterns, were registered. At small angles of incidence (less than 3°), cavitation on the plate was found to begin in form of a streak array (bubble-band) whereas the one on the hydrofoil in the form of travelling bubbles. For the regimes with developed cavitation on the NACA0015 hydrofoil, the scattered and discontinuous bubble streaks grow but subsequently merge into larger bubble clouds forming a remarkably regular lattice pattern. However, once the incidence angle increased to 9°, the cavitation pattern on the hydrofoil changed to a streaky pattern like that for the plate at small attack angles, whereas the regime on the plate showed no significant changes.

The time-averaged velocity and turbulent characteristics distributions show that the incipience of cavitation is governed by the development of the carrier-fluid flow around the foil leading edges, but the subsequent flow pattern depends strongly on the cavitation regime and showed markedly different distributions compared to the noncavitating regime.

HIGH-SPEED IMAGING, PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY, PLATE, NACA0015 HYDROFOIL, SPATIAL STRUCTURE AND DYNAMICS OF PARTIAL CAVITIES, TURBULENT CHARACTERISTICS