

УДК 532.528 + 532.574.7 + 532.582.32

ИЗМЕРЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАВИТИРУЮЩИХ ТЕЧЕНИЙ ВБЛИЗИ ДВУМЕРНЫХ ГИДРОПРОФИЛЕЙ МЕТОДОМ PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY

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

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-08-01304-а) и Правительства Российской Федерации (грант № 11.G34.31.0046, ведущий ученый – К. Ханьялич, ГОУ ВПО «Новосибирский государственный университет»)

АННОТАЦИЯ

Работа направлена на экспериментальное исследование турбулентной структуры течений при кавитационном обтекании одиночной пластины, гидрокрыла НАСА0015 и каскада гидрокрыльев НАСА0015. В результате измерений, проведенных методом PIV/LIF, были получены мгновенные поля скорости течения, и на их основе рассчитаны двумерные распределения средней скорости потока и всех статистических

моментов турбулентных пульсаций скорости до третьего порядка включительно. В работе показано, что с уменьшением числа кавитации формирование турбулентного следа начинается выше по течению. При этом наблюдается значительное увеличение поперечных размеров следа, а также происходит интенсификация турбулентных пульсаций вследствие генерации крупномасштабных вихревых структур.

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, и гидротехнических сооружений, например, подводящие тракты и отсасывающие трубы гидроэлектростанций, 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 пульсаци-

онные характеристики течения вследствие взаимного влияния непрерывной фазы и частиц дисперсной фазы.

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.

На данный момент в мировой литературе можно найти много работ по экспериментальному моделированию кавитирующих течений вблизи двумерных подводных крыльев. Основные результаты представляют собой визуальные наблюдения, режимные карты с качественным описанием, точечные измерения давления и скорости ([4] и [5]). Также существуют исследования, направленные на изучение влияния ло-

кального 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 описания см. [1], [2] и [3]). Тем не менее, несмотря на большое количество работ по исследованию кавитирующих течений, до сих пор детальная количественная информация, необходимая для оптимизации существующих математических моделей, крайне ограничена даже для упрощенных условий. С точки зрения развития и совершенствования современных численных методов, описывающих возникно-

вление 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 моделированию нестационарного кавитационного обтекания одиночных двумерных модельных профилей и каскада гидрокрыльев и измерению распределений турбулентных характеристик для данных течений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

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° 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 м³/ч, что соответствует максимальной скорости течения в пустом канале (без тела обтекания) 15,3 м/с.

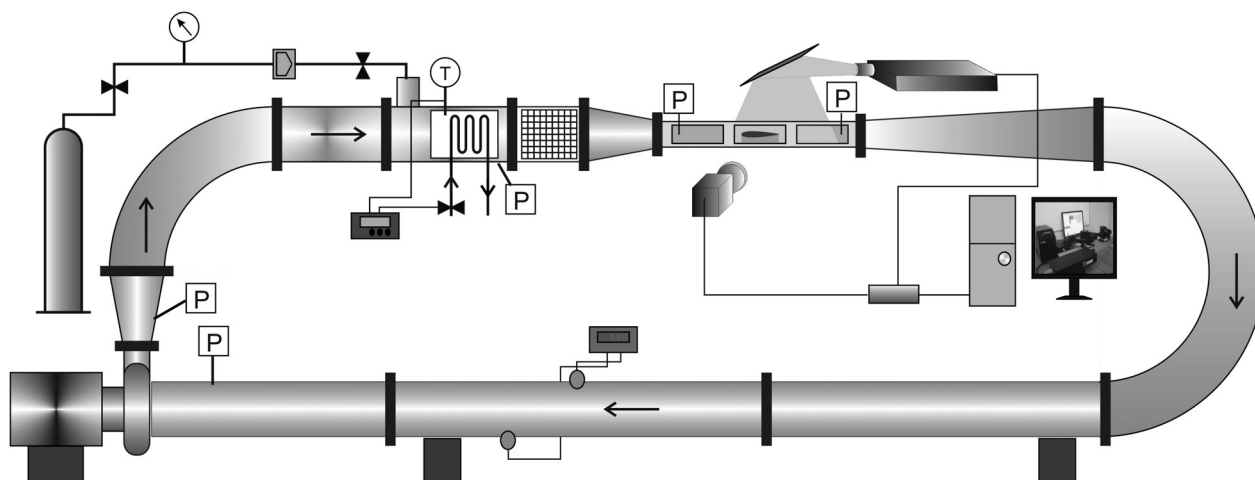


Рис.1 Схема гидродинамического кавитационного стенда ИТ СО РАН, где P – датчик давления, T – датчик температуры.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве модельных тел обтекания были выбраны пластина с закругленной носовой частью, гидрокрыло NASA0015 и каскад, состоящий из трех идентичных гидрокрыльев. Длина хорды всех тел составляла 100 мм, толщина пластины – 15 мм. В случае каскада смежные гидрокрылья располагались на расстоянии 60 мм друг от друга. Для того чтобы иметь оптический доступ до среднего профиля каскада, расположенного по центру рабочего канала, который является наиболее репрезентативным с точки зрения моделирования, одно из крайних крыльев было изготовлено из оргстекла. Остальные крылья 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 $\sigma = (P_{\text{вх}} - P_{\text{пв}}) / (\rho \cdot U_0^2 / 2)$, 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 $P_{\text{пв}} = 0.044$ бар. Начальный уровень турбулентных пульсаций скорости течения u_{rms} / U_0 был менее 1%. Число Рейнольдса, рассчитанное по среднерасходной скорости течения в рабочем канале U_0 и хорде тел обтекания L , находилось в пределах $0,9 \div 2 \cdot 10^6$. Число Струхала $Sh = f \cdot C / U_0$, определяемое как отношение произведения максимальной длины каверны C и характерной частоты отрыва кавитационной каверны f для данного режима к среднерасходной скорости течения U_0 , было около 0,32 для пластины и 0,18 для гидрокрыла NASA0015.

Мгновенная скорость течения измерялась с помощью измерительного комплекса «ПО-

ЛИС», состоящего из двойного импульсного Nd-АИГ лазера Quantel Big Sky 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, разрешенные матрицы 2048×2048 пикселей), снабженной объективом AF Nikkor 28 mm f/2.8D 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 610 мм. Размер измерительной области составлял приблизительно 285×250 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).

Поля мгновенной скорости рассчитывались с помощью итерационного кросс-корреляционного алгоритма с непрерывным смещением и деформацией элементарных расчетных ячеек и 50% перекрытием расчетных областей. Подпиксельная интерполяция кросс-корреляционного 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 16×16 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. Полученные векторные поля мгновенной скорости подвергались последовательно двум процедурам валидации: по соотношению сигнал/шум с коэффициентом 2 и адаптивному медианному фильтру по области 7×7 пикселей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ниже представлены результаты 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 случае каскада с передней кромкой центрального гидропрофиля) в измерительной плоскости при $\alpha = 0^\circ$. Типы кавитационных каверн, их динамика и пространственная структура для приведенных ниже режимов обтекания подробно описаны в работе [6].

Как видно из Рис.2, во всех трех случаях после торможения потока вблизи передней кромки гидрокрыльев средняя скорость течения локально становится больше U_0 в области течения между гидропрофилем и верхней стенкой рабочего канала, а также между

профилями каскада. В зависимости от режима максимальные значения средней скорости изменяются. С уменьшением σ наблюдается рост значений U_{\max} до тех пор, пока режим обтекания не становится облачным. После этого наблюдается обратный процесс. Данный факт объясняется следующим образом. Как известно, при переходе к облачному типу кавитационного обтекания возникают интенсивные пульсации паровой каверны и, как следствие, скорости потока в области каверны, что приводит к уменьшению значений средней скорости в этой зоне. Однако при этом, очевидно, также происходит рост амплитуды турбулентных пульсаций скорости в области каверны (см. Рис.3).

Кроме того, на Рис.2 можно видеть характерный след за каждым из профилей с двумя отчетливо выраженными слоями смешения, в котором скорость течения ниже U_0 . Таким об-

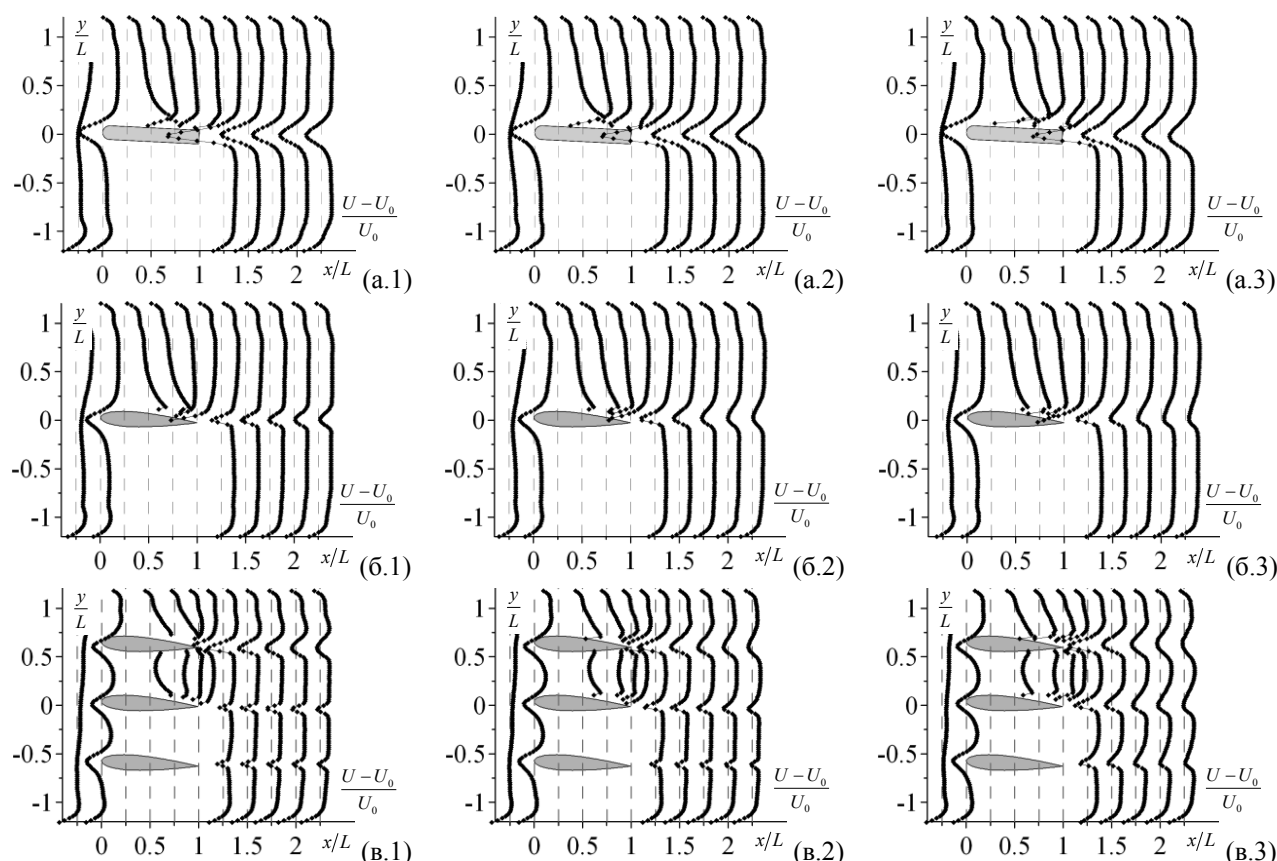


Рис.2 Эволюция продольной компоненты средней скорости вниз по течению в сравнении с U_0 при обтекании (а) пластины при (1) $\sigma = 1,92$, $C/L = 0,23$, (2) $\sigma = 1,76$, $C/L = 0,3$, (3) $\sigma = 1,56$, $C/L = 0,5$, $Sh = 0,32$, (б) одиночного гидрокрыла NACA0015 при (1) $\sigma = 1,22$, $C/L = 0,5$, (2) $\sigma = 1,05$, $C/L = 1$, (3) $\sigma = 0,96$, $C/L = 1,1$, $Sh = 0,18$ и (в) каскада при (1) $\sigma = 1,54$ ($\xi = 1,13$), (2) $\sigma = 1,4$ ($\xi = 1,01$), (3) $\sigma = 1,3$ ($\xi = 0,94$). $\alpha = 3^\circ$.

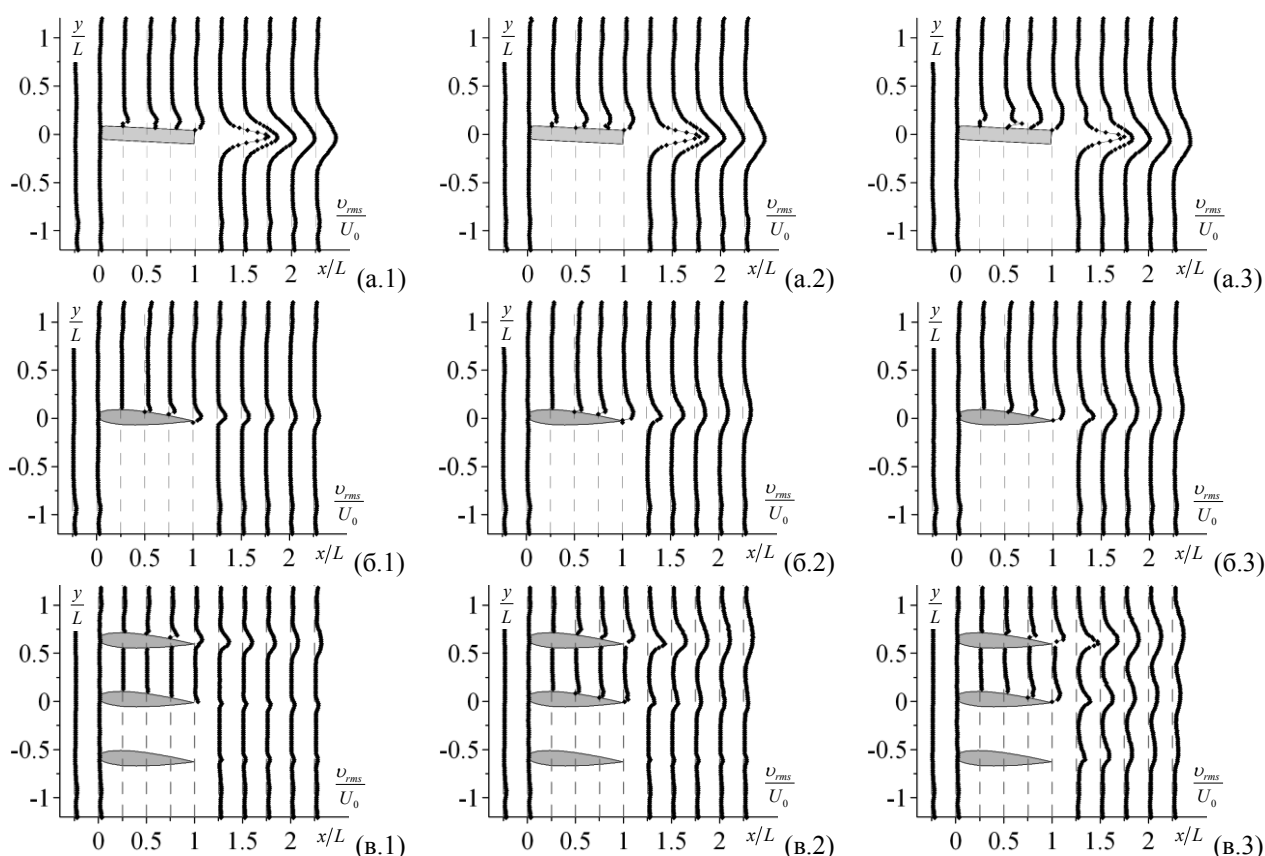


Рис.3 Эволюция пульсационной составляющей поперечной компоненты скорости (средне-квадратичные значения) вниз по течению при обтекании (а) пластины при (1) $\sigma = 1,92$, $C/L = 0,23$, (2) $\sigma = 1,76$, $C/L = 0,3$, (3) $\sigma = 1,56$, $C/L = 0,5$, $Sh = 0,32$, (б) одиночного гидрокрыла NACA0015 при (1) $\sigma = 1,22$, $C/L = 0,5$, (2) $\sigma = 1,05$, $C/L = 1$, (3) $\sigma = 0,96$, $C/L = 1,1$, $Sh = 0,18$ и (в) каскада при (1) $\sigma = 1,54$ ($\xi = 1,13$), (2) $\sigma = 1,4$ ($\xi = 1,01$), (3) $\sigma = 1,3$ ($\xi = 0,94$). $\alpha = 3^\circ$.

разом, можно предполагать, что в следе за гидрокрыльями происходит турбулизация течения, что подтверждается распределениями на Рис.3. Турбулентный след является наиболее выраженным в случае пластины, что объясняется неоптимальностью ее формы. В случае каскада след за верхним профилем шире, чем за другими (особенно отчетливо это можно видеть на режиме с развитой кавитационной каверной при $\sigma = 1,3$). При уменьшении числа кавитации формирование турбулентного следа начинается выше по потоку. Это объясняется более ранней турбулизацией пограничного слоя за профилями (см. Рис.3) за счет развития неустойчивости кавитационной каверны. С уменьшением σ также происходит увеличение поперечного размера следа и уменьшение скорости в нем.

Анализ распределений пульсационной составляющей скорости (см. Рис.3) показывает,

что с уменьшением числа кавитации амплитуда пульсаций скорости возрастает. В случае каскада рост происходит с разной скоростью для различных гидрокрыльев: для верхнего профиля быстрее, для нижнего медленнее. Для среднего профиля при переходе к режиму с $\sigma=1,3$ амплитуда турбулентных пульсаций возрастает примерно в три раза, так же как и для одиночного профиля. Рост амплитуды пульсаций скорости связан с генерацией КВС.

На Рис.2 можно видеть, что в целом средние картины течений для одиночного гидрокрыла NACA0015 и каскада подобны, однако существуют и достаточно существенные отличия (ср. Рис.2-б и Рис.2-в). Так, область течения, где достигаются максимальные значения скорости течения, для одиночного профиля существенно меньше, значения ско-

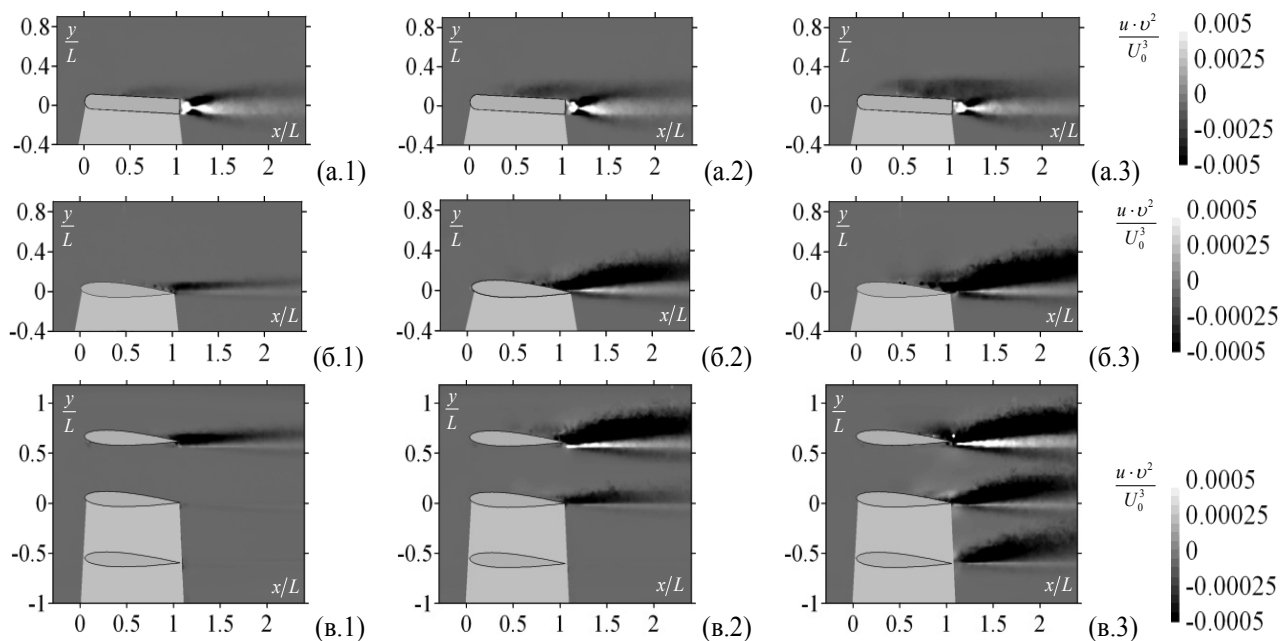


Рис.4 Двумерные распределения третьего статистического момента турбулентных пульсаций скорости жидкости при обтекании (а) пластины при (1) $\sigma = 1,92$, $C/L = 0,23$, (2) $\sigma = 1,76$, $C/L = 0,3$, (3) $\sigma = 1,56$, $C/L = 0,5$, $Sh = 0,32$, (б) одиночного гидрокрыла $NACA0015$ при (1) $\sigma = 1,22$, $C/L = 0,5$, (2) $\sigma = 1,05$, $C/L = 1$, (3) $\sigma = 0,96$, $C/L = 1,1$, $Sh = 0,18$ и (в) каскада при (1) $\sigma = 1,54$ ($\xi = 1,13$), (2) $\sigma = 1,4$ ($\xi = 1,01$), (3) $\sigma = 1,3$ ($\xi = 0,94$). $\alpha = 3^\circ$.

рости также меньше. Кроме того, среднерасходная скорость течения для каскада ниже, чем для одиночного профиля. Из сравнения пространственных распределений поперечных составляющих КЭТ для каскада и одиночного крыла (ср. Рис.3-б и Рис.3-в), можно видеть, что переход к облачному типу кавитационного обтекания для обоих случаев приводит к существенному росту турбулентных пульсаций.

Таким образом, из сравнения кавитационного обтекания одиночного профиля и каскада можно констатировать, что числа кавитации сильно отличаются для относительно близких (по типу кавитационного обтекания и длине каверны) режимов, в результате чего прямое сравнение обтекания для этих двух случаев крайне затруднено. Судя по всему, число кавитации в общепризнанном определении не совсем корректно отражает условия возникновения кавитации для каскада профилей. Поэтому для того, чтобы иметь возможность сравнить эти два течения, для случая обтекания каскада гидрокрыльев можно ввести новый кавитационный параметр (локальное число кавитации), который учитывает локаль-

ные условия вблизи гидропрофиля, то есть $\xi = (P - P_{нв}) / (\rho \cdot U^2 / 2)$, где P и U – локальные значения среднего статического давления и продольной компоненты средней скорости, которые оцениваются, например, посередине межлопастного канала в сечении, проходящем через передние кромки гидрокрыльев. Необходимо заметить, что в данной работе локальное значение статического давления не измерялось, а было оценено по закону Бернулли, который может быть применен к той области течения, где пульсации скорости невелики. При таком определении числа ξ его значения составляют 1,13 при $\sigma=1,54$ и 0,94 при $\sigma=1,3$, что в принципе достаточно близко к значениям числа кавитации в случае обтекания одиночного профиля.

На Рис.4 в качестве примера представлены распределения третьего статистического момента пульсаций скорости жидкости, соответствующего турбулентной диффузии кинетической энергии турбулентности в продольном направлении, для тех же трех случаев. Можно констатировать, что в целом динамика изменения распределений схожа с динамикой изменения моментов второго порядка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что при переходе к режиму облачной кавитации гидродинамическая структура всего течения претерпевает существенные изменения. При переходе к облачному типу кавитационного обтекания интенсивность турбулентных пульсаций в турбулентном следе возрастает примерно в три раза вследствие генерации крупномасштабных вихревых структур, а его формирование начинается выше по потоку. При этом наблюдается значительное увеличение поперечных размеров следа. За пластиной формируется более выраженный турбулентный след по сравнению

с гидрокрылом НАСА0015, поскольку форма пластины плохо обтекаемая.

Сравнение кавитационного обтекания каскада и одиночного профиля показывает сходство распределений турбулентных характеристик. Однако количественные значения как средних, так и пульсационных величин существенно отличаются, главным образом, за счет различий в распределениях среднего давления, а также взаимного влияния кавитационных облаков. Кроме того, инкремент роста пульсаций при понижении числа кавитации для одиночного профиля выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Laberteaux K.R., Seccio S.L. Partial cavity flows. Part 1. Cavities forming on models without spanwise variation // *J. Fluid Mech.* – 2001. – Vol. 431. – P. 1 – 41.
5. 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. – N 5. – P. (052101)-20.
6. Кравцова А.Ю., Маркович Д.М., Первунин К.С., Тимошевский М.В. Высокоскоростная визуализация кавитационных каверн на различных режимах обтекания двумерных гидропрофилей // Труды X научной международной конференции “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”. – Алушта, 2012.