

УДК 532.528+532.574.7+532.582.32

КАВИТАЦИЯ НА РИФЛЕННОМ ДВУМЕРНОМ ГИДРОКРЫЛЕ ПРИ МАЛОМ УГЛЕ АТАКИ

Тимошевский Михаил Викторович¹,
timoshevskiy.mv@gmail.com

Первунин Константин Сергеевич¹,
pervunin@itp.nsc.ru

Маркович Дмитрий Маркович^{1,2,3},
dmark@itp.nsc.ru

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 1.

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Кавитация представляет собой один из основных источников неустойчивостей течения, возникающих при эксплуатации гидравлического оборудования, а также является причиной эрозионного износа его рабочих элементов. В этой связи разработка и развитие различных методов управления кавитационными течениями является актуальной задачей для задержки развития кавитации и снижения ее негативного влияния. Одним из таких методов является модификация поверхности гидрокрыла.

Цель работы: экспериментальное исследование кавитационного обтекания рифленого гидрокрыла с продольными бороздками полукруглого профиля на поверхности (НЛ2), представляющего собой уменьшенную модель направляющей лопатки высоконапорной гидротурбины, в сравнении с моделью оригинальной направляющей лопатки (НЛ1).

Методы. Для анализа пространственной структуры и временной эволюции паровых каверн и оценки их интегральных характеристик была применена высокоскоростная визуализация. Скорость течения над гидрокрыльями и в их следе измерялась с помощью метода PIV, на основе измеренных ансамблей полей мгновенной скорости были получены распределения средних и турбулентных характеристик течения.

Результаты. На лопатке с модифицированной поверхностью (НЛ2) кавитация зарождается в виде одиночных изолированных пузырей в канавках, которые при уменьшении числа кавитации переходят в кавитирующие стрики. Пока стрики локализованы в канавках и не взаимодействуют друг с другом, режим обтекания остается стационарным. Однако когда их размер становится больше диаметра желобков, они выходят за пределы этих углублений, взаимодействуют и образуют единую каверну, которая теряет устойчивость и начинает пульсировать. В целом бороздки на поверхности гидрокрыла позволяют в некоторой степени задержать развитие кавитации и воспрепятствовать переходу к нестационарным режимам обтекания. На нестационарном режиме динамика каверн на оригинальном гидрокрыле (НЛ1) и НЛ2 сильно отличается. Так, на НЛ1 в отличие от НЛ2 каверна никогда не исчезает полностью, каверна на НЛ1 в среднем оказывается длиннее и пульсирует с большей частотой ($St=0,09$) по сравнению с НЛ2 ($St=0,06$). Кроме того, поведение каверны в течение одного периода пульсаций оказалось довольно необычным для обеих моделей: сначала она увеличивается до максимального размера, затем несколько уменьшается и снова вырастает до максимума, после чего возвращается в исходное состояние. Причина такой динамики пока остается невыясненной. На переходном режиме обтекания, когда внутри бороздок формируются кавитирующие стрики, интенсивность турбулентных флуктуаций скорости над поверхностью НЛ2 снижается по сравнению с режимом пузырьковой кавитации. Это происходит потому, что изолированные каверны в желобках как бы восстанавливают форму модифицированного гидрокрыла, делая геометрию его поверхности более приближенной к оригинальной (НЛ1). Таким образом, профиль НЛ2 становится более заполненным благодаря локальной кавитации в бороздках. Вместе с тем наличие канавок на поверхности НЛ2 приводит к дополнительной турбулизации течения вблизи поверхности лопатки для всех рассматриваемых режимов течения, что, вероятно, и является причиной задержки развития кавитации на гидрокрыле с бороздками.

Ключевые слова:

Кавитация, частичные каверны, нестационарности, управление потоком, рифленая поверхность, гидрокрыло, высокоскоростная визуализация, PIV.

Введение

Известно, что кавитация, возникающая на рабочих элементах гидравлического оборудования, и сопровождающие ее различные гидродинамические явления, в особенности нестационарные, являются крайне нежелательными в силу того, что приводят к нарушению режимов эксплуатации, эрозии и механическому износу поверхностей, усилению шума и росту вибрационных нагрузок на несущие конструкции. Все это ведет к сниже-

нию эффективности гидромашин и увеличению продолжительности и количества плановых и текущих ремонтов, а следовательно, более длительному простоя техники и сокращению срока ее службы. Ввиду того, что на сегодняшний день форма и конфигурация рабочих элементов современных гидравлических систем уже максимально оптимизированы, их совершенствование фактически невозможно без применения и развития различных методов управления реализующимися в них

течениями. Выбор наиболее подходящего метода и подбор оптимальных параметров управления, в свою очередь, основываются на углубленном понимании физики наблюдаемых процессов, для чего требуется высокоразрешающая визуализация и подробные результаты измерений и численного моделирования. Как следствие, существует необходимость в комплексных исследованиях динамики двухфазных турбулентных течений сложной геометрии.

В настоящее время существует несколько активных и пассивных методов управления кавитационными течениями. К активным относятся такие из них, как изменение количества кавитационных зародышей в набегающем потоке посредством наложения ультразвукового поля или проведения электролиза жидкости [1, 2], инъекция или отбор жидкостей, газов или полимеров через поверхность обтекаемого тела [3–5], а также принудительная турбулизация пограничного слоя путем наложения внешних возмущений [6]. Однако необходимо отметить, что не все из них могут быть использованы для управления течениями в гидравлическом оборудовании. Все пассивные методы основаны на изменении физико-химических свойств поверхности тела за счет использования (супер) гидрофильных или (супер) гидрофобных материалов [7], на модификации морфологии поверхности путем создания нерегулярной шероховатости [8, 9] или нанесения регулярных структур [10–12], а также на применении податливых покрытий [13–15]. Пассивные методы в отличие от активных легче реализуемы в условиях работы гидромашин и не требуют подведения энергии к системе извне. Это делает их использование более предпочтительным перед активными методами, хотя сами по себе они являются менее универсальными и не позволяют управлять кавитирующими течениями в таком широком диапазоне параметров, как активные.

На сегодняшний день в литературе представлено несколько работ, в которых достаточно подробно описано влияние морфологии поверхности на кавитацию. Так, было показано, что при повышенной нерегулярной шероховатости длина пленочной каверны может увеличиваться, возрастать частота ее пульсаций на нестационарных режимах и даже изменяться тип кавитационного обтекания [8–10, 16]. В данном случае основными параметрами, оказывающими влияние на паровую каверну, являются средний уровень шероховатости, осредненная высота неровностей профиля и средний шаг элементов шероховатости [9]. В случае, когда на поверхности тела обтекания нанесены регулярные структуры, определяющими параметрами являются размер, форма и ориентация этих структур и расстояние между ними по двум направлениям [17]. В литературе представлены результаты для структур в форме уступов [10], продольных желобков [12, 18], клиньев [17] и регулярных двумерных преград [11]. По мнению авторов настоящей рабо-

ты, наиболее эффективными среди них всех являются поверхностные структуры в виде продольных полукруглых бороздок [12, 18], которые в оптимальной конфигурации позволили сильно затянуть зарождение кавитации и переход к нестационарному режиму обтекания по числу кавитации в сопле Вентури.

Данная статья посвящена экспериментальному изучению кавитационного обтекания рифленого гидрокрыла, представляющего собой уменьшенную модель направляющей лопатки высоконапорной гидротурбины, в сравнении с моделью оригинальной лопатки. На поверхности рифленого гидрокрыла были нанесены продольные бороздки, геометрия и взаимное положение которых согласно [12] были подобраны оптимальным образом с точки зрения задержки развития кавитации. Исследование было проведено в достаточно широком диапазоне чисел кавитации при фиксированном угле атаки. Основные выводы сделаны на основе анализа результатов высокоскоростной визуализации присоединенных каверн и сравнения распределений средней скорости и турбулентных характеристик течения для обеих моделей.

Конфигурация модельных гидрокрыльев и условия проведения эксперимента

В настоящей работе объектами исследования выступали два стандартизованных двумерных симметричных гидрокрыла серии НАСА0022–34 с длиной хорды $C=100$ мм, поверхность одного из них была модифицирована (рис. 1). Их форма была выбрана как наиболее приближенная к реальному профилю направляющей лопатки (НЛ) высоконапорной турбины, для уменьшенной модели которой исследования были проведены ранее [19]. Обе модели НЛ были изготовлены из латуни со средним уровнем шероховатости поверхности около 1,5 мкм. Оси вращения обоих крыльев располагались строго в их геометрических центрах. Их максимальная толщина составляла $H_{\max}=0,22 C$ и достигалась на расстоянии $x_{\max}=0,4014 C$ от передней кромки. Радиус округления носовой части и высота усеченной задней кромки были равны 1,33 и 0,44 мм соответственно. Соотношение размеров лопаток (отношение размаха гидропрофиля к его хорде) a/C было равно 0,8, что хорошо соответствует ряду практических случаев. Для управления течением исходная геометрия одного из гидрокрыльев (НЛ2) была модифицирована таким образом, что с обеих его сторон (разрежения и поджатия) были симметрично нанесены продольные полукруглые бороздки от передней до задней кромки (рис. 1, б). Согласно результатам работ [12] и [18], на сопле Вентури для задержки развития кавитации наиболее эффективной конфигурацией выбранного варианта пассивного метода управления является следующая. Центры желобков должны располагаться точно на образующей линии профиля оригинального гидрокрыла, а следовательно, их глубина l должна быть равна их радиусу. Как

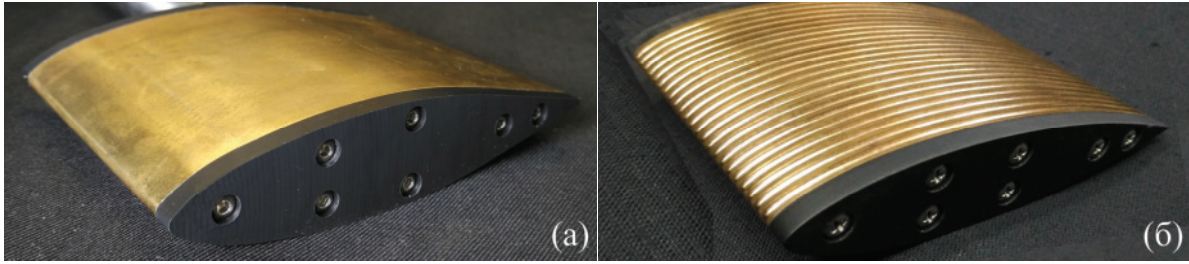


Рис. 1. Фотографии собранных моделей НЛ: (а) оригинальной лопатки (НЛ1) и (б) модифицированного гидрокрыла с продольными бороздками (НЛ2)

Fig. 1. Photographs of the assembled GV models: (a) the original vane (GV1) and (b) the modified hydrofoil with streamwise grooves (GV2)

было показано в вышеупомянутых исследованиях, оптимальным диаметром бороздок является $d=2$ мм, а соответственно, их глубина $l=1$ мм. Расстояние между краями соседних пазов e также должно быть равно 1 мм. Эта конфигурация и была в точности реализована на НЛ2 (рис. 2). Ближайший к стенке рабочего канала желоб на поверхности НЛ2 располагался на расстоянии $w=6$ мм. Это было сделано для того, чтобы выполнить некоторые технические требования при изготовлении крыла и соблюсти центральную симметрию. В результате на передней кромке НЛ2 также присутствовали бороздки (рис. 3, а). Однако на задней кромке НЛ2, где две поверхности гидрокрыла сходятся под острым углом, за счет бороздок с обеих сторон были сформированы параболические вырезы длиной 2,45 мм (рис. 3, б).

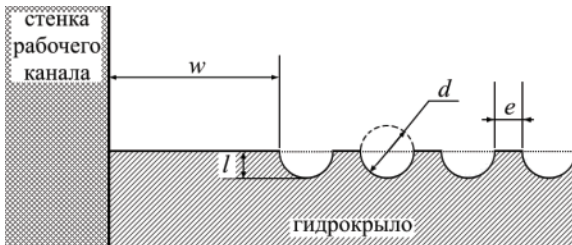


Рис. 2. Схема поперечного вертикального сечения НЛ2 на расстоянии $x_{\max}/C=0,4014$ от передней кромки гидрокрыла с указанием геометрических параметров бороздок: диаметр бороздки – d , глубина бороздки – l , расстояние между краями соседних бороздок – e , расстояние от стенки канала до ближайшей бороздки – w

Fig. 2. Scheme of the vertical cross-section of GV2 at the distance of $x_{\max}/C=0,4014$ from the foil leading edge with indication of geometric parameters of the grooves: groove diameter – d , groove depth – l , distance between the edges of neighboring grooves – e , distance from the channel wall to the nearest groove – w

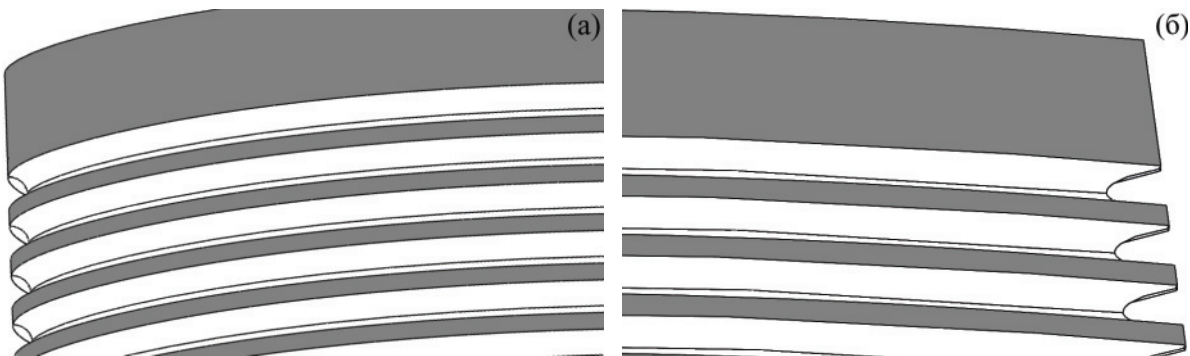


Рис. 3. Увеличенное изображение трехмерной модели гидрокрыла НЛ2 вблизи (а) передней и (б) задней кромки

Fig. 3. Blow-up of a 3D model of the GV2 hydrofoil nearby (a) the leading and (b) trailing edges

Эксперименты проводились на кавитационном гидродинамическом стенде Института теплофизики СО РАН. Описание стенда, условий эксперимента и используемых методов измерений дано в [20]. Динамика и пространственная структура парогазовых каверн, а также их интегральные параметры, такие как длина присоединенной каверны и частота отрыва кавитационных облаков, анализировались с помощью высокоскоростной видеосъемки с частотой дискретизации 20 кГц. Скорость потока измерялась методом PIV с использованием в качестве трассеров флуоресцентных частиц. Процедура обработки данных от исходных PIV изображений до расчета статических характеристик полностью совпадала с той, что описана в [19]. Исследования были выполнены для угла атаки $\alpha=3^\circ$. В экспериментах различные кавитацион-

ные режимы достигались путем варьирования числа кавитации $\sigma = (p_{in} - p_v) / (\rho U_0^2 / 2)$, где p_{in} – давление на входе в рабочий канал; p_v – давление насыщенных паров рабочей жидкости (дистиллированной воды); ρ – плотность рабочей жидкости, за счет изменения скорости набегающего потока U_0 . По причине того, что геометрии поверхностей лопаток отличались, перекрытие потока для оригинальной (НЛ1) и модифицированной (НЛ2) моделей при одинаковом угле атаки также было разным: для НЛ1 площадь перекрытия составляла $S_1 = ah(\alpha)$, где h – высота миделевого сечения крыла – сечения, в котором проекция крыла на ось y , зависящая от угла атаки α , достигает максимального значения ($h = H_{max}$ при $\alpha = 0^\circ$), тогда как для НЛ2 она была равна $S_2 = S_1(\alpha) - S_G(\alpha)$, где S_G – суммарная площадь всех полукруглых бороздок. В случае малых углов атаки S_G не зависит от α , и можно принять, что $S_G = N_G \pi d^2 / 8$, где $N_G = 46$ – общее количество желобков с обеих сторон гидрокрыла. При $\alpha = 3^\circ$ $S_1 = 80 \cdot 22,03 = 1762,4$ мм² и $S_G = 72,26$ мм². Вследствие этого при одних и тех же условиях обтекания кавитация на НЛ2 в экспериментах зарождалась позднее (при меньших числах кавитации), чем на НЛ1. Для корректного сравнения результатов для обеих лопаток необходимо учитывать влияние разной степени перекрытия рабочего канала. Поэтому при дальнейшем анализе данных для НЛ2 используется модифицированное число кавитации $\sigma^* = \sigma [1 + \Delta]$, где $\Delta = (S_1 - S_2) / S_1 = S_G / S_1 \approx 0,04$, учитывающее влияние этого параметра. Здесь необходимо отметить, что данное линейное приближение справедливо, поскольку добавка Δ мала по сравнению со значением самого числа кавитации.

Результаты

Далее представлен анализ и обсуждение результатов экспериментального исследования кавитационного обтекания модифицированного гидрокрыла (НЛ2) в сравнении с оригинальной моделью лопатки (НЛ1) при угле атаки $\alpha = 3^\circ$ для нескольких режимов по числу кавитации: однофазный поток, пузырьковая кавитация, переходный и нестационарный режимы. Вначале на основе визуальных данных рассматривается влияние геометрии поверхности на пространственную структуру (рис. 4), размеры (рис. 5) и временную эволюцию (рис. 6) кавитационных каверн в зависимости от режима течения. Затем на рис. 7, 8 приводится сравнение распределений средней скорости и турбулентных характеристик на примере продольной составляющей флуктуационной скорости вблизи поверхности гидрокрыла для нескольких выбранных режимов, влияние бороздок на которых наиболее выражено. Для представленных результатов используется следующая система координат. Ось абсцисс направлена по направлению течения, ось ординат – перпендикулярно ему в измерительном сечении. На приведенных полях скорости (рис. 7) начало системы координат ($x_0/C=0$, $y_0/C=0$) соот-

ветствует положению передней кромки гидрокрыла в измерительной плоскости при $\alpha = 0^\circ$. На графиках (рис. 8) в каждом сечении x/C значение $y_0/C=0$ находится на поверхности обоих гидрокрыльев.

Высокоскоростная визуализация

На оригинальной лопатке кавитация зарождается при $\sigma \approx 1,1$ в виде одиночных пузырей (рис. 4). При $\sigma \approx 1,03$ зона кавитации (область на стороне разрежения гидрокрыла, в пределах которой образуются кавитационные полости) распространяется в продольном направлении от сечения $x/C=0,1$ до $x/C=0,4$ (рис. 5, а.1). На модифицированном гидрокрыле НЛ2 при $\sigma^* = 1,05$ кавитация еще не наблюдается (рис. 5, б.1). Одиночные кавитационные пузырьки возникают только при $\sigma^* = 0,95$ (рис. 5, б.2), тогда как на НЛ1 при $\sigma = 0,95$ кавитация является уже вполне развитой, режим обтекания становится переходным, который характеризуется большим количеством взаимодействующих пузырей (рис. 5, а.2). Однако в случае НЛ2 кавитационные пузырьки развиваются внутри желобков и не взаимодействуют друг с другом (рис. 5, б.2). Зона кавитации на НЛ2 располагается между сечениями $x/C=0,25$ и $x/C=0,4$, то есть ее продольный размер $L_c/C=0,15$, тогда как на НЛ1 $L_c/C=0,57$ (рис. 4). Таким образом, продольные канавки позволяют заметно затянуть зарождение и развитие кавитации. При уменьшении числа кавитации до $\sigma = 0,89$ в случае оригинального гидрокрыла происходит переход к нестационарному режиму кавитационного обтекания (рис. 5, а.3), причем размер зоны кавитации остается практически неизменным ($L_c/C=0,61$) (рис. 4). Соответствующий режим на модифицированной лопатке является стационарным (рис. 5, б.3). При этом кавитация принимает форму изолированных стриков внутри бороздок, которые все еще не формируют единой каверны, однако область кавитации значительно увеличивается, так что $L_c/C=0,44$ (рис. 4). Здесь необходимо заметить, что образование единой каверны по всему размаху крыла является необходимым условием для перехода к нестационарному режиму обтекания, который, вообще говоря, является крайне нежелательным и опасным. В случае НЛ2 это означает, что для перехода к нестационарному режиму течения отдельные стрики должны развиваться и пульсировать синхронно. При дальнейшем уменьшении числа кавитации до $\sigma^* = 0,87$ и ниже каверны внутри бороздок НЛ2 увеличиваются в поперечном размере и выходят за их пределы, формируя каверну размером $L_c/C=0,5$ (рис. 4). Каверна становится восприимчивой к флуктуациям давления в рабочем канале, что вызывает переход к нестационарному режиму кавитационного обтекания (рис. 5, б.4). Для близкого числа кавитации ($\sigma = 0,84$) на НЛ1 наблюдается развитый нестационарный режим при длине каверны $L_c/C=0,66$ (рис. 5, а.4).

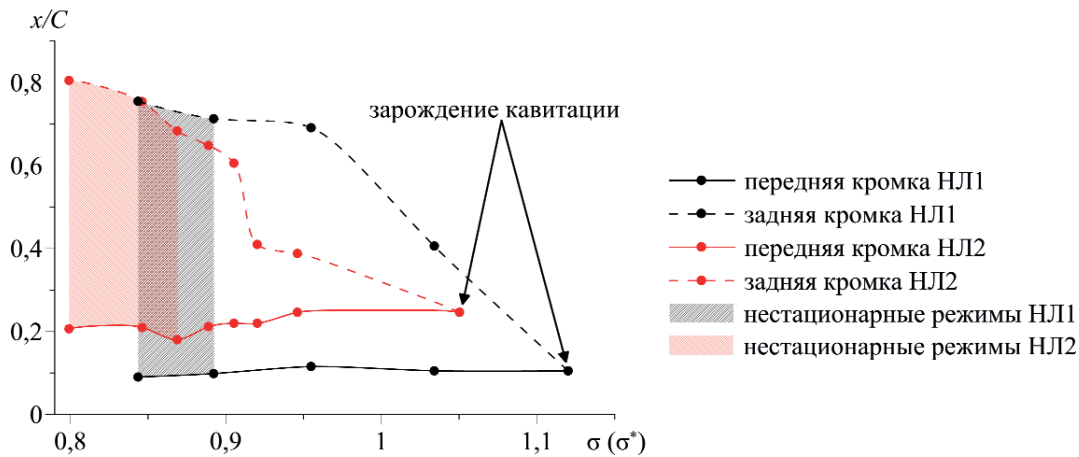


Рис. 4. Зависимость положения и продольного размера кавитационной зоны от числа кавитации для обеих моделей лопаток

Fig. 4. Dependence of the location and streamwise dimension of a cavitation area on the cavitation number for both vane models

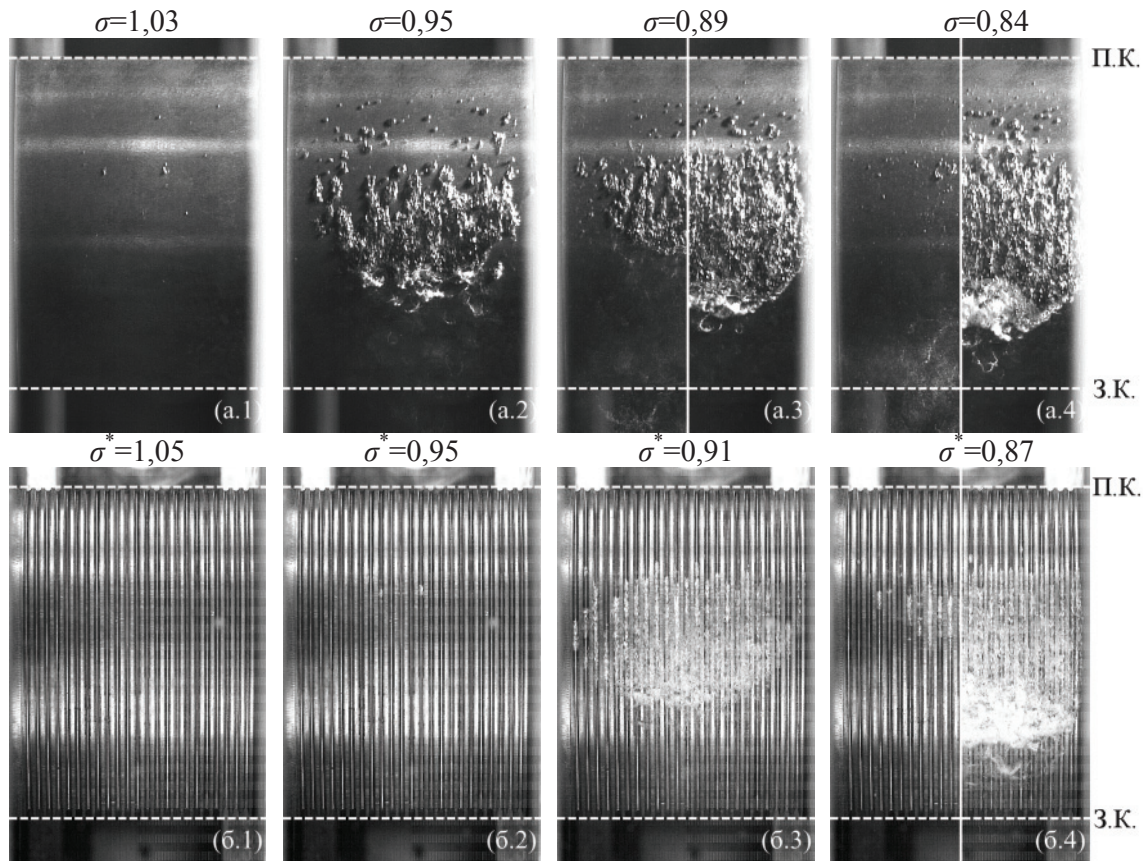


Рис. 5. Фотографии частичных каверн (вид сверху), возникающих на стороне разрежения (а) оригинального (НЛ1) и (б) модифицированного (НЛ2) гидрокрыла для следующих режимов кавитационного обтекания: (1) $\sigma=1,03$ ($\sigma^*=1,05$) – пузырьковая кавитация (докавитационный режим), (2) $\sigma=0,95$ ($\sigma^*=0,95$) – переходный режим (пузырьковая кавитация), (3) $\sigma=0,89$ ($\sigma^*=0,91$) – нестационарная каверна (переходный режим) и (4) $\sigma=0,84$ ($\sigma^*=0,87$) – нестационарная каверна. Для нестационарных режимов течения на одном изображении представлены половины фотографий для двух фаз развития присоединенной каверны, когда она имеет (левая) минимальную (в тот момент времени, по прошествии которого каверна начинает расти) и (правая) максимальную длину (непосредственно перед разрывом межфазной границы каверны). Направление потока сверху вниз

Fig. 5. Photographs of partial cavities (top view) occurring on the suction side of the (a) original (GV1) and (b) modified (GV2) hydrofoils for the following cavitating flow regimes: (1) $\sigma=1,03$ ($\sigma^*=1,05$) – transient bubbles (subcavitating flow), (2) $\sigma=0,95$ ($\sigma^*=0,95$) – transitional regime (transient bubbles), (3) $\sigma=0,89$ ($\sigma^*=0,91$) – unsteady cavity (transitional regime) and (4) $\sigma=0,84$ ($\sigma^*=0,87$) – unsteady cavity. For unsteady flow conditions, half-images indicating two phases of the attached cavity evolution are shown together in the same picture when (left) it has the shortest (at the moment whereupon the cavity starts to grow) and (right) the longest length (immediately before the cavity interface breakup). The flow direction is from the top

На рис. 6 представлена временная эволюция каверн на нестационарном режиме обтекания лопаток, соответствующем рис. 5, а.4 и 5, б.4. Можно видеть, что динамика каверн для НЛ1 и НЛ2 сильно отличается. Так, на НЛ1 в отличие от НЛ2 каверна никогда не исчезает полностью (на рис. 6 это видно, когда положения передней и задней кромки совпадают). Минимальная длина каверны в случае НЛ1 оказывается $L_c/C \approx 0,31$. При этом на НЛ1 положение передней кромки каверны стационарно и находится в сечении $x/C=0,1$, в то время как для НЛ2 оно изменяется в диапазоне от $x/C=0,2$ до $0,3$. Задняя кромка каверны при максимальной ее длине в обоих случаях достигает сечения $x/C \approx 0,76$. Следовательно, для сравниваемых нестационарных режимов длина каверны на НЛ2 оказывается в среднем меньше, чем на НЛ1. Кроме того, на рис. 6 можно заметить, что продолжительность периодов пульсаций длины каверны для НЛ1 (T_1) и НЛ2 (T_2) также отличается: $T_1=85$ мс, $T_2=123$ мс. Это означает, что каверны на двух моделях совершают автоколебания с разной частотой, так что соответствующие числа Струхала равны $St=fC/U_0=0,09$ и $0,06$ для НЛ1 и НЛ2. Для обоих гидрокрыльев достаточно необычной является ситуация, когда каверна успевает в течение одного периода пульсаций увеличиться до максимального размера, потом несколько уменьшиться и снова вырасти до максимума, после чего вернуться в исходное состояние (рис. 6). В данном случае между двумя максимумами длина каверны сокращается до $L_c/C \approx 0,45$ на НЛ1 и до $L_c/C \approx 0,16$ на НЛ2. Чем вызвано такое поведение каверны на рассматриваемых моделях, пока остается невыясненным.

Распределения скорости

В этом разделе приведен сравнительный анализ распределений средней скорости и турбулентных характеристик течения для оригинального (НЛ1) и модифицированного (НЛ2) гидрокрыльев. На полях средней скорости (рис. 7, а) можно видеть, что вблизи поверхности модифицированного гидрокрыла распределения скорости от его передней кромки до середины остаются практически неизменными при изменении числа кавитации. Однако в хвостовой части лопатки дефект скорости становится меньше в абсолютном выражении (ср. рис. 7, а.1 и 7, а.2, рис. 8, а.1 и 8, а.2) при переходе от режима пузырьковой кавитации ($\sigma^*=0,95$, рис. 5, б.2) к более развитому ($\sigma^*=0,91$, рис. 5, б.3). Как следствие, уменьшается и амплитуда турбулентных флуктуаций скорости, хотя турбулизация пограничного слоя в случае переходного режима начинается выше по потоку (рис. 7, б.1 и 7, б.2). На соответствующих графиках видно, что $\tilde{u}/U_0=0,21$ в сечении $x/C=1$ в случае пузырьковой кавитации (рис. 8, б.1) и $\tilde{u}/U_0=0,16$ в том же сечении для переходного режима (рис. 8, б.2). Это довольно нетипично для кавитационного обтекания гидрокрыльев: как правило, чем более развитой является каверна, тем сильнее она турбулизует поток. Данный эффект предположительно имеет следующее объяснение. Возникновение стриковой кавитации в бороздках (рис. 5, б.3) приводит к тому, что профиль НЛ2 становится более заполненным, то есть изолированные каверны в желобках как бы восстанавливают форму модифицированного гидрокрыла, делая геометрию его поверхности ближе к НЛ1. Таким образом, профиль НЛ2 становится более обтекаемым благодаря локальной кавитации в

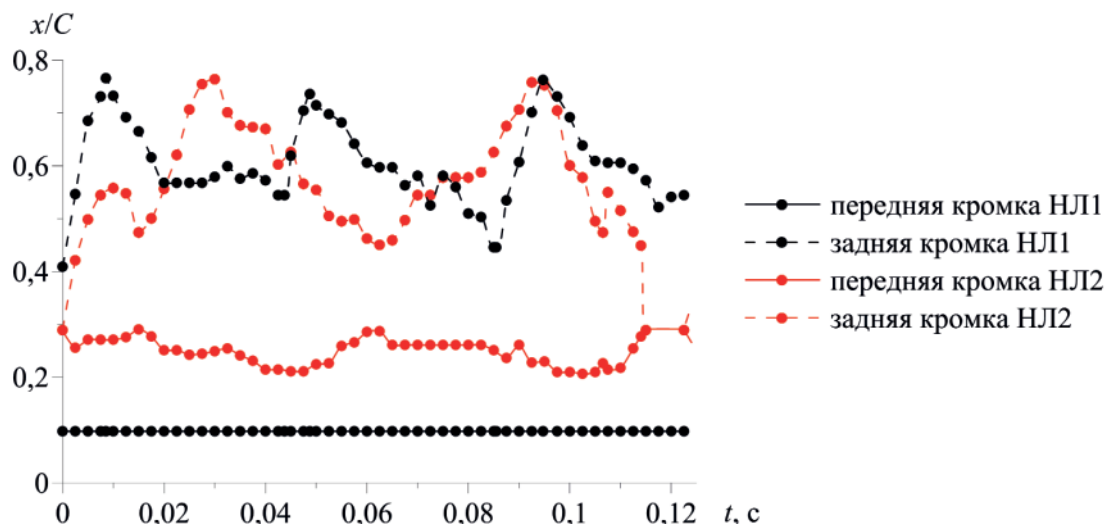


Рис. 6. Изменение во времени положения передней и задней кромок каверны в центральном продольном сечении гидрокрыльев в течение приблизительно одного периода автоколебаний для нестационарного режима течения при $\sigma=0,84$ ($\sigma^*=0,87$)

Fig. 6. Time variation of locations of the cavity detachment and terminus in the central longitudinal section of both hydrofoils during approximately one period of auto-oscillations for the unsteady flow conditions at $\sigma=0,84$ ($\sigma^*=0,87$)

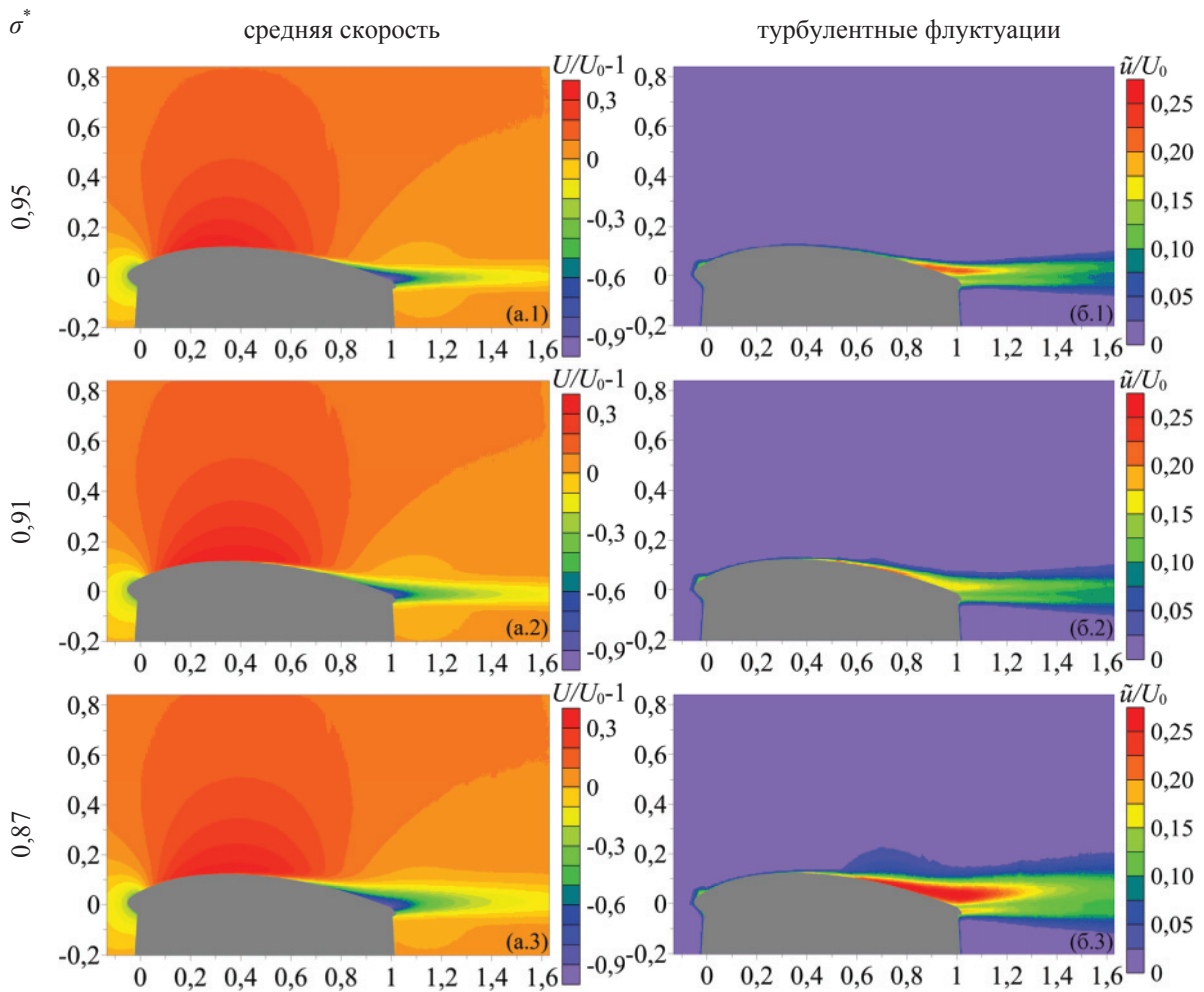


Рис. 7. Распределения продольной компоненты (а) средней скорости (в виде дефекта скорости) и (б) флуктуационной составляющей скорости (среднеквадратичные значения) со стороны разрежения НЛ2 для следующих режимов течения: (1) $\sigma^*=0,95$ – пузырьковая кавитация, (2) $\sigma^*=0,91$ – переходный режим и (3) $\sigma^*=0,87$ – нестационарная каверна. Направление потока слева направо

Fig. 7. Distributions of the streamwise component of (a) the mean velocity (in form of the velocity defect) and (б) fluctuating velocity (r.m.s. values) over the suction side of GV2 for the following flow conditions: (1) $\sigma^*=0,95$ – transient bubbles, (2) $\sigma^*=0,91$ – transitional regime and (3) $\sigma^*=0,87$ – unsteady cavity. The flow direction is from the left

бороздках. При переходе к нестационарному режиму течения ($\sigma^*=0,87$, рис. 5, б.4) пульсации длины каверны вызывают значительное увеличение амплитуды турбулентных флуктуаций, $\tilde{u}/U_0=0,26$ (рис. 7, б.3 и 8, б.3), что соответствует обычному изменению структуры течения при переходе к нестационарным режимам обтекания.

Сравнение средних и турбулентных характеристик вблизи обеих моделей показывает значительные отличия в структуре течения (рис. 8). Так, при $\sigma^*=0,95$ ($\sigma^*=0,95$) (рис. 5, а.2 и 5, б.2) толщина следа за НЛ1 примерно в два раза больше, чем за НЛ2 (см. сечение $x/C=1$, рис. 8, а.1). Пограничный слой на НЛ1 также начинает развиваться выше по потоку (сечение $x/C=0,7$, рис. 8, а.1). В результате этого, а также благодаря тому, что каверна на оригинальном крыле на данном режиме более развита, интенсивность турбулентности над НЛ1 и в ее

следе интегрально оказывается заметно выше, чем для НЛ2 (рис. 8, б.1).

Вместе с тем важно отметить, что наличие канавок на поверхности НЛ2 приводит к дополнительной турбулизации течения вблизи поверхности лопасти для всех рассматриваемых режимов течения (см. сечение $x/C=0,4$, рис. 8, б.1, 8, б.2 и 8, б.3), что, как можно предполагать, и является причиной задержки развития кавитации (рис. 5, а.2 и 5, б.2). Для следующего режима ($\sigma^*=0,95$ ($\sigma^*=0,95$), рис. 5, а.3 и 5, б.3) различие в профилях турбулентных флуктуаций оказывается еще более заметным (рис. 8, б.2), хотя различие в распределениях средней скорости становится наоборот менее выраженным (рис. 8, а.2). Причиной этого, как говорилось выше, является то обстоятельство, что кавитирующие стрйки внутри бороздок заполняют профиль НЛ2, делая его

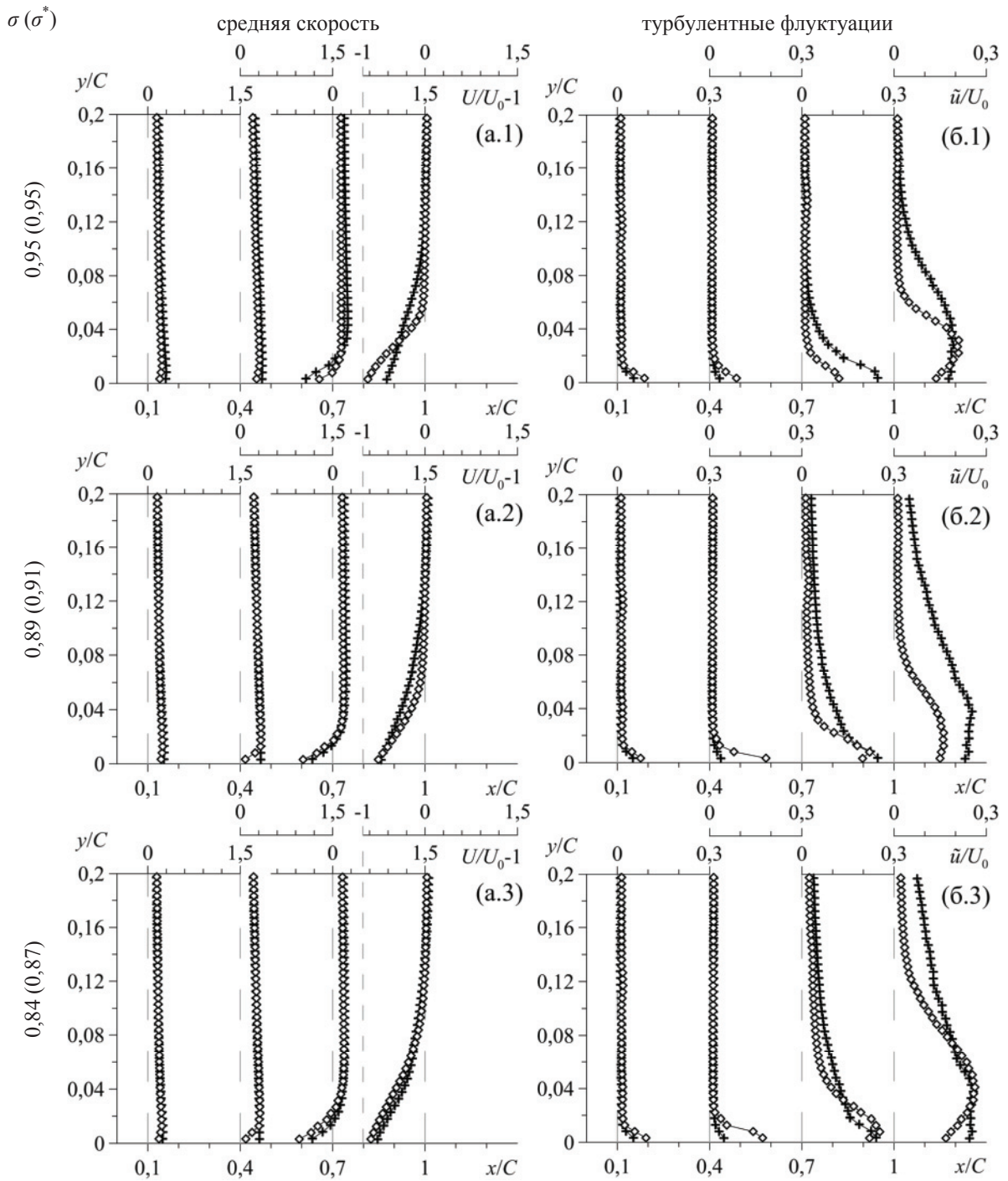


Рис. 8. Профили продольной компоненты (а) средней скорости (в виде дефекта скорости) и (б) флуктуационной составляющей скорости (среднеквадратичные значения) в нескольких поперечных сечениях со стороны разрежения НЛ1 (+) и НЛ2 (◇) для следующих режимов обтекания: (1) $\sigma=0,95$ ($\sigma^*=0,95$) – переходный режим (пузырьковая кавитация), (2) $\sigma=0,89$ ($\sigma^*=0,91$) – нестационарная каверна (переходный режим) и (3) $\sigma=0,84$ ($\sigma^*=0,87$) – нестационарная каверна. Направление потока слева направо

Fig. 8. Profiles of the streamwise component of the (a) mean velocity (in form of the velocity defect) and (б) fluctuating velocity (r.m.s. values) in several cross-sections over the suction side of GV1 (+) and GV2 (◇) for the following flow conditions: (1) $\sigma=0,95$ ($\sigma^*=0,95$) – transitional regime (transient bubbles), (2) $\sigma=0,89$ ($\sigma^*=0,91$) – unsteady cavity (transitional regime) and (3) $\sigma=0,84$ ($\sigma^*=0,87$) – unsteady cavity. The flow direction is from the left

более обтекаемым. На нестационарном режиме течения ($\sigma=0,84$ ($\sigma^2=0,87$), рис. 5, а.4 и 5, б.4) профили как средней, так и флуктуационной составляющей скорости становятся достаточно близкими (рис. 8, а.3 и 8, б.3) в виду того, что представляют собой некоторые осредненные по фазам развития каверны величины.

Заключение и выводы

С помощью высокоскоростной визуализации и метода PIV была изучена возможность управления кавитационным обтеканием гидрокрыла, представляющего собой уменьшенную модель направляющей лопатки (НЛ) гидротурбины, за счет изменения геометрии его поверхности. С этой целью было проведено сравнительное исследование двух образцов: один имел оригинальную форму (НЛ1), а второй (НЛ2) был модифицирован. Модификация НЛ2 заключалась в создании с обеих сторон ее поверхности продольных желобков полукруглого сечения. Форма и конфигурация этих желобков соответствовали оптимальным согласно результатам работ [12, 18]. Эксперименты были проведены для различных режимов обтекания, начиная с докавитационного и заканчивая нестационарными режимами с развитой кавитационной каверной, при угле атаки $\alpha=3$ градуса. В исследовании особое внимание было уделено влиянию модификации поверхности на зарождение и развитие кавитации, а также изменение пространственной структуры присоединенной каверны и режима кавитационного обтекания. Прямое сравнение измеренных распределений средней скорости и турбулентных характеристик на примере флуктуационной компоненты скорости в окрестности обеих моделей позволило выявить ряд особенностей обтекания, связанных с геометрическими различиями.

В результате было показано, что на НЛ2 кавитация зарождается в виде одиночных изолированных пузырей в канавках, которые при уменьшении числа кавитации переходят в кавитирующие стрики. Пока стрики локализованы в канавках и не взаимодействуют друг с другом, режим обтекания остается стационарным. Однако, когда поперечный размер стриков становится больше диаметра желобков, они выходят за пределы этих углублений, взаимодействуют и образуют единую ка-

верну, которая сразу же становится неустойчивой и начинает пульсировать. В целом желобки на поверхности гидрокрыла позволяют в некоторой степени задержать развитие кавитации и затян timer переход к нестационарным режимам обтекания. На нестационарном режиме динамика каверн на НЛ1 и НЛ2 сильно отличается. Так, на НЛ1 в отличие от НЛ2 каверна никогда не исчезает полностью, каверна на НЛ1 в среднем оказывается длиннее и пульсирует с большей частотой ($St=0,09$) по сравнению с НЛ2 ($St=0,06$). Кроме того, поведение каверны в течение одного периода пульсаций оказалось довольно необычным для обеих моделей: сначала она увеличивается до максимального размера, затем несколько уменьшается и снова вырастает до максимума, после чего возвращается в исходное состояние. Причина такой динамики пока остается невыясненной.

Измерения средней и флуктуационной составляющей скорости течения позволили обнаружить, что на переходном режиме обтекания, когда внутри бороздок формируются кавитирующие стрики, интенсивность турбулентных флуктуаций скорости над поверхностью НЛ2 снижается по сравнению с режимом пузырьковой кавитации. Это происходит потому, что изолированные каверны в желобках приближают форму модифицированного гидрокрыла к оригинальной (НЛ1). Таким образом, профиль НЛ2 становится более заполненным благодаря локальной кавитации в бороздках. Вместе с тем удалось показать, что канавки на поверхности НЛ2 вызывают локальную турбулизирующую течения вблизи стенки для всех рассматриваемых режимов течения, что, вероятно, и является причиной задержки развития кавитации на гидрокрыле с бороздками. В целом данный пассивный метод управления кавитационным обтеканием гидрокрыла можно считать достаточно эффективным, более того, он может быть легко реализован в натуральных условиях реальных гидроагрегатов. Данный подход может также применяться одновременно с другими методами для более эффективного управления обтеканием рабочих элементов гидротурбин.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № №16–38–00814-мол_a и 17–08–01199-a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chatterjee D., Arakeri V.H. Towards the concept of hydrodynamic cavitation control // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1997. – V. 332. – P. 377–394.
2. Chatterjee D., Arakeri V.H. Some investigations on the use of ultrasonics in travelling bubble cavitation control // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2004. – V. 504. – P. 365–389.
3. Manipulating cavitation by a wall jet: Experiments on a 2D hydrofoil / M.V. Timoshevskiy, I.I. Zapryagaev, K.S. Pervunin, L.I. Maltsev, D.M. Markovich, K. Hanjalić // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2017. – V. 99. – P. 312–328.
4. Hydrofoil performance control introducing tangential liquid jet / P.G. Kozhukharov, V.H. Hadjimikhalev, V.I. Mikuta, L.I. Maltsev // *ASME Fluids Engineering Division*. – 1985. – V. 31. – P. 67–74.
5. Tip vortex cavitation suppression by active mass injection / N. Chang, H. Ganesh, R. Yakushiji, S.L. Ceccio // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2011. – V. 133. – № 11. – P. (111301)–11.
6. Franc J.P., Michel J.M. Unsteady attached cavitation on an oscillating hydrofoil // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1988. – V. 193. – P. 171–189.
7. Tassin Leger A., Ceccio S.L. Examination of the flow near the leading edge of attached cavitation. Part 1. Detachment of two-di-

- mensional and axisymmetric cavities // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1998. – V. 376. – P. 61–90.
8. Effect of wall roughness on the dynamics of unsteady cavitation / O. Coutier-Delgosha, J.-F. Devillers, M. Leriche, T. Pichon // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2005. – V. 127. – № 4. – P. 726–733.
 9. Cavitation on NACA0015 hydrofoils with different wall roughness: high-speed visualization of the surface texture effects / S.A. Churkin, K.S. Pervunin, A.Yu. Kravtsova, D.M. Markovich, K. Hanjalić // *Journal of Visualization*. – 2016. – V. 19. – № 4. – P. 587–590.
 10. Mechanism and control of cloud cavitation / Y. Kawanami, H. Kato, H. Yamaguchi, M. Tanimura, Y. Tagaya // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 1997. – V. 119. – № 4. – P. 788–794.
 11. The effects of a tripped turbulent boundary layer on vortex shedding from a blunt trailing edge hydrofoil / Ph. Ausoni, A. Zobeiri, F. Avellan, M. Farhat // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2012. – V. 134. – № 5. – P. (051207)–11.
 12. Cavitation regime detection through Proper Orthogonal Decomposition – Dynamics analysis of the sheet cavity on a grooved convergent-divergent nozzle / A. Danlos, F. Ravelet, O. Coutier-Delgosha, F. Bakir // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2014. – V. 47. – P. 9–20.
 13. Cavity induced vibration of flexible hydrofoils / D.T. Akcabay, E.J. Chae, Y.L. Young, A., Ducoin, J.A. Astolfi // *Journal of Fluids and Structures*. – 2014. – V. 49. – P. 463–484.
 14. Experimental study of the steady fluid-structure interaction of flexible hydrofoils / G.A. Zarruk, P.A. Brandner, B.W. Pearce, A.W. Phillips // *Journal of Fluids and Structures*. – 2014. – V. 51. – P. 326–343.
 15. Experimental and numerical investigation of hydroelastic response of a flexible hydrofoil in cavitating flow / Q. Wu, B. Huang, G. Wang, Y. Gao // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2015. – V. 74. – P. 19–33.
 16. Stutz B. Influence of Roughness on the Two-Phase Flow Structure of Sheet Cavitation // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2003. – V. 125. – P. 2652–2659.
 17. Effects of Grooves on Cavitation around the Body of Revolution / Y. Li, H. Chen, J. Wang, D. Chen // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2010. – V. 132 (1). – P. (011301)–7.
 18. Study of the cavitating instability on a grooved venturi profile / A. Danlos, J.-E. Mehal, F. Ravelet, O. Coutier-Delgosha, F. Bakir // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2014. – V. 136. – P. (101302)–10.
 19. Особенности кавитационного обтекания уменьшенной модели направляющих лопаток радиально-осевой турбины / М.В. Тимошевский, С.А. Чуркин, А.Ю. Кравцова, К.С. Первунин, Г.А. Семёнов, Д.М. Маркович, К. Ханъялич // *Известия Томского политехнического университета: Инжиниринг георесурсов*. – 2015. – Т. 326. – № 6. – С. 79–94.
 20. Кавитация на пластине с закругленной носовой частью и гидрокрыле NASA0015: визуализация и измерение скорости / А.Ю. Кравцова, Д.М. Маркович, К.С. Первунин, М.В. Тимошевский, К. Ханъялич // *Известия российской академии наук. Энергетика*. – 2014. – № 4. – С. 96–106.

Поступила 07.07.2018 г.

Информация об авторах

Тимошевский М.В., младший научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Первунин К.С., младший научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Маркович Д.М., доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, директор Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; профессор физического факультета Новосибирского национального исследовательского государственного университета; профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 532.528+532.574.7+532.582.32

CAVITATION ON A GROOVED TWO-DIMENSIONAL HYDROFOIL AT A SMALL ANGLE OF ATTACK**Mikhail V. Timoshevskiy**¹,
timoshevskiy.mv@gmail.com**Konstantin S. Pervunin**¹,
pervunin@itp.nsc.ru**Dmitriy M. Markovich**^{1,2,3},
dmark@itp.nsc.ru¹ Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1, Lavrentyev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.² Novosibirsk National Research State University,
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Abstract. Cavitation is one of the main sources of flow instabilities arising during the operation of hydraulic equipment and it is also a cause of erosion wear of its working parts. In this regard, the elaboration and development of various methods of cavitating flow control is an urgent problem for hampering cavitation evolution and reducing its negative impact. One of these methods is a hydrofoil surface modification.

The main aim of the study is to investigate experimentally cavitating flow around a ribbed hydrofoil with a streamwise semi-circular grooves on the surface (GV2) representing a scaled-down model of a guide vane of a Francis turbine in comparison with a model of the original vane (GV1).

The methods. In order to analyze the spatial structure and time dynamics of vapor cavities and evaluate their integral parameters, a high-speed imaging was applied. The flow velocity over the hydrofoils and in their wakes was measured by a PIV method, distributions of the mean and turbulent flow characteristics were obtained on the basis of the measured ensembles of instantaneous velocity fields.

Results. On the vane with the modified surface (GV2), cavitation originates as single isolated bubbles travelling in the grooves that transform into cavitating streaks, when the cavitation number is decreased. While the streaks are located inside the grooves and do not interact with each other, the flow regime remains stable. However, when their size becomes larger than the groove diameter, they extend beyond these hollows, interact and form an entire cavity which immediately becomes unstable and starts to oscillate. In general, the grooves on the hydrofoil surface are capable to hinder the cavitation development to some extent and delay the transition to unsteady flow regimes. When the flow is unsteady, the cavity dynamics on the original hydrofoil (GV1) and GV2 is very different. For example, unlike GV2, the cavity on GV1 never disappears completely, the cavity on GV1 is longer on the average and pulsates at a higher frequency ($St=0,09$) compared to GV2 ($St=0,06$). In addition, the cavity behavior during one period of the oscillations turned out to be quite unusual for both models: first it elongates to its maximum size, then somewhat decreases and again grows to the maximum, after which it returns to its initial state. The reason for such dynamics is still unclear. At the transitional flow regime, when cavitating streaks are formed inside the grooves, the intensity of turbulent fluctuations over the GV2 surface is decreased in comparison with the regime of transient bubble cavitation. This occurs because the isolated cavities inside the grooves are likely to restore the shape of the modified foil, making the geometry of its surface closer to the original one (GV1). Thus, the GV2 profile becomes more streamlined due to local cavitation in the grooves. Besides, the grooves on the GV2 surface cause a local flow turbulization close to the wall for all flow regimes under consideration, which is probably the reason of the delay in cavitation evolution on the grooved hydrofoil.

Key words:

Cavitation, partial cavities, instabilities, flow control, grooved surface, hydrofoil, high-speed imaging, PIV.

The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects no. 16–38–00814-мол_a and 17–08–01199-a).

REFERENCES

1. Chatterjee D., Arakeri V.H. Towards the concept of hydrodynamic cavitation control. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, vol. 332, pp. 377–394.
2. Chatterjee D., Arakeri V.H. Some investigations on the use of ultrasonics in travelling bubble cavitation control. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, vol. 504, pp. 365–389.
3. Timoshevskiy M.V., Zapryagaev I.I., Pervunin K.S., Maltsev L.I., Markovich D.M., Hanjalić K. Manipulating cavitation by a wall jet: Experiments on a 2D hydrofoil. *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, vol. 99, pp. 312–328.
4. Kozhukharov P.G., Hadjimikhalev V.H., Mikuta V.I., Maltsev L.I. Hydrofoil performance control introducing tangential liquid jet. *ASME Fluids Engineering Division*, 1985, vol. 31, pp. 67–74.
5. Chang N., Ganesh H., Yakushiji R., Ceccio S.L. Tip vortex cavitation suppression by active mass injection. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2011, vol. 133, no. 11, pp. (111301)–11.
6. Franc J.P., Michel J.M. Unsteady attached cavitation on an oscillating hydrofoil. *Journal of Fluid Mechanics*, 1988, vol. 193, pp. 171–189.
7. Tassin Leger A., Ceccio S.L. Examination of the flow near the leading edge of attached cavitation. Part 1. Detachment of two-di-

- mensional and axisymmetric cavities. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, vol. 376, pp. 61–90.
8. Coutier-Delgosha O., Devillers J.-F., Leriche M., Pichon T. Effect of wall roughness on the dynamics of unsteady cavitation. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2005, vol. 127, no. 4, pp. 726–733.
 9. Churkin S.A., Pervunin K.S., Kravtsova A.Yu., Markovich D.M., Hanjalić K. Cavitation on NACA0015 hydrofoils with different wall roughness: high-speed visualization of the surface texture effects. *Journal of Visualization*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 587–590.
 10. Kawanami Y., Kato H., Yamaguchi H., Tanimura M., Tagaya Y. Mechanism and control of cloud cavitation. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1997, vol. 119, no. 4, pp. 788–794.
 11. Ausoni Ph., Zobeiri A., Avellan F., Farhat M. The effects of a tripped turbulent boundary layer on vortex shedding from a blunt trailing edge hydrofoil. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2012, vol. 134, no. 5, pp. (051207)–11.
 12. Danlos A., Ravelet F., Coutier-Delgosha O., Bakir F. Cavitation regime detection through Proper Orthogonal Decomposition – Dynamics analysis of the sheet cavity on a grooved convergent-divergent nozzle. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2014, vol. 47, pp. 9–20.
 13. Akcabay D.T., Chae E.J., Young Y.L., Ducoin A., Astolfi J.A. Cavitation induced vibration of flexible hydrofoils. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, vol. 49, pp. 463–484.
 14. Zarruk G.A., Brandner P.A., Pearce B.W., Phillips A.W. Experimental study of the steady fluid-structure interaction of flexible hydrofoils. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, vol. 51, pp. 326–343.
 15. Wu Q., Huang B., Wang G., Gao Y. Experimental and numerical investigation of hydroelastic response of a flexible hydrofoil in cavitating flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, vol. 74, pp. 19–33.
 16. Stutz B. Influence of Roughness on the Two-Phase Flow Structure of Sheet Cavitation. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2003, vol. 125, pp. 2652–2659.
 17. Li Y., Chen H., Wang J., Chen D. Effects of Grooves on Cavitation around the Body of Revolution. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2010, vol. 132 (1), pp. (011301)–7.
 18. Danlos A., Mehal J.-E., Ravelet F., Coutier-Delgosha O., Bakir F. Study of the cavitating instability on a grooved venturi profile. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2014, vol. 136, pp. (101302)–10.
 19. Timoshevskiy M.V., Churkin S.A., Kravtsova A.Yu., Pervunin K.S., Semenov G.A., Markovich D.M., Hanjalić K. Features of the cavitating flow around a scaled-down model of guide vanes of a radial-axis turbine. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 6, pp. 79–94. In Rus.
 20. Kravtsova A.Yu., Markovich D.M., Pervunin K.S., Timoshevskiy M.V., Hanjalić K. Cavitation on a semicircular leading-edge plate and NACA0015 hydrofoil: visualization and velocity measurement. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 14, pp. 1003–1010. In Rus.

Received: 7 July 2018.

Information about the authors

Mikhail V. Timoshevskiy, junior researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Konstantin S. Pervunin, junior researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Dmitriy M. Markovich, Dr. Sc., corresponding member of the Russian Academy of Sciences, director, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; professor, Novosibirsk National Research State University; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.