

УДК 532.528+532.574.7+532.582.32

УПРАВЛЕНИЕ КАВИТАЦИЕЙ НА ДВУМЕРНОМ ГИДРОКРЫЛЕ ПОСРЕДСТВОМ НЕПРЕРЫВНОЙ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Тимошевский Михаил Викторович^{1,2},
timoshevskiy.mv@gmail.com

Запрягаев Иван Игоревич^{1,2},
ivanzapryagaev@gmail.com

Первунин Константин Сергеевич^{1,2},
pervunin@itp.nsc.ru

Мальцев Леонид Иванович¹,
maltzev@itp.nsc.ru

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

Ханьялич Кемал^{2,4},
khanjalic@gmail.com

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, 2.

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

⁴ Делфтский технический университет, Нидерланды, 2628 BL, Delft, Julianalaan, 136.

Возникновение разного рода неустойчивостей, в том числе вызванных кавитацией, в проточных трактах гидравлических систем негативным образом сказывается на производительности, надежности и безопасности гидротехнического и гидроэнергетического оборудования. Данное обстоятельство требует развития разных методов управления такими течениями.

Цель работы: определение возможности применения и оценка эффективности метода управления динамикой частичных каверн, основанного на непрерывной тангенциальной инъекции жидкости.

Методы исследования. Для изучения этапов развития и пространственной структуры, а также оценки интегральных параметров парогозовых каверн применялась высокоскоростная визуализация. Измерение пространственных распределений средней скорости и турбулентных характеристик одно- и двухфазных течений вблизи модельного гидрокрыла осуществлялось методом анемометрии по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry – PIV).

Результаты. Исследования проводились на модифицированной модели направляющих лопаток высоконапорной турбины, оснащенной поперечным щелевым каналом в поверхности для генерации пристенной струи с целью подпитки дополнительным импульсом подторможенных слоев жидкости со стороны разрежения. В экспериментах угол атаки модельного гидропрофиля изменялся от нуля до девяти градусов, а различные условия обтекания достигались путем вариации числа кавитации в широком диапазоне. На основе визуального анализа реализующихся режимов течения, начиная от зарождения кавитации и заканчивая развитыми нестационарными кавернами, определялось влияние инъекции на кавитацию. Эффект инжектирования жидкости с разной скоростью на гидродинамику течения оценивался путем измерений ансамблей мгновенной скорости, по которым рассчитывались распределения средних и турбулентных характеристик. Показано, что низкоскоростная инъекция жидкости вдоль поверхности гидропрофиля приводит к интенсификации турбулентных флуктуаций в пограничном слое и тем самым затягивает развитие присоединенной каверны вследствие порождения дополнительных возмущений в потоке. Инъекция с высокой скоростью, в свою очередь, вызывает увеличение локальной скорости течения и снижение турбулентных флуктуаций вблизи поверхности, что позволяет повысить коэффициент подъемной силы крыла и его гидродинамическое качество за счет снижения давления со стороны разрежения при относительно небольших энергетических затратах на генерацию пристенной струи. Однако в данном случае кавитационная каверна становится длиннее. Таким образом, низкоскоростная инъекция оказывается эффективной для ослабления кавитации, но инжектирование жидкости с высокой скоростью более предпочтительно с точки зрения гидродинамики течения. Следовательно, реализованный метод управления представляет собой весьма действенное средство для управления гидродинамическими характеристиками крыла и снижения интенсивности парообразования и при определенных условиях даже подавления нестационарностей, связанных с кавитацией.

Ключевые слова:

Кавитация, частичные каверны, нестационарность, управление потоком, непрерывная тангенциальная инъекция, направляющая лопатка, высокоскоростная визуализация, PIV.

Введение

Развитие разного рода неустойчивостей в потоках гидравлических систем негативным образом сказывается на производительности, надежности и безопасности гидротехнического и гидроэнергетического оборудования. Как следствие, из-за роста амплитуды пульсаций расхода и давления существенно увеличиваются нагрузки на компоненты гидравлических машин. Одним из наиболее распространенных и опасных источников нестационарностей являются кавитационные процессы. Для управления кавитацией можно использовать различные методы воздействия на элементы гидравлической системы, которые позволяют значительно подавить уровень шума техники и вибрационных нагрузок на элементы несущих конструкций и исключить или существенно снизить риски возникновения резонансных явлений. Управление кавитационными процессами необходимо для задержки развития самой кавитации, а также для полного или хотя бы частичного избавления от ее негативного влияния. В связи с этим детальное исследование причин и механизмов развития неустойчивостей и разработка способов для эффективного управления кавитирующими течениями являются крайне актуальными задачами как со стороны фундаментальной науки, так и для совершенствования современного машинного оборудования.

Хорошо известно, что при определенных условиях присоединенные каверны становятся неустойчивыми [1–3]. Согласно современной классификации существует два основных вида неустойчивости частичных (неполных) каверн [3]: внутренние (естественные) и внешние (системные). Если неустойчивость порождается самой каверной, она называется внутренней. Если же она вызвана взаимодействием каверны с другими кавернами или элементами гидравлической системы, например подводящими и отводящими каналами, неустойчивость является внешней. Хорошо исследованная облачная кавитация, сопровождающаяся квазипериодическими отрывами парогазовых облаков, обусловлена развитием естественной неустойчивости – возвратного течения под каверной ([4–6]). Наиболее распространенным случаем системных неустойчивостей является так называемый кавитационный скачок (описание в [3]), который характерен для относительно длинных и тонких каверн (обычно для каверн длиной 75–100 % от длины хорды тела). При этом пульсации каверны возникают вследствие распространения волн давления вдоль канала. Данный тип неустойчивости характеризуется колебаниями на частотах в два и более раз меньшими, чем при облачной кавитации.

Управление зарождением и развитием кавитации может осуществляться как активными, так и пассивными способами. На сегодняшний день существует несколько перспективных методов активного управления кавитационными потоками,

основанных на различных базовых принципах и доказавших свою эффективность на практике. Наиболее известными из них являются контроль количества ядер кавитации посредством ультразвука или электролиза [7, 8], инжекция или отбор жидкости через поверхность тела обтекания [9] и принудительная турбулизация пограничного слоя путем наложения внешних колебаний [10]. Во всех пассивных методах управление кавитацией осуществляется путем изменения свойств поверхности тем или иным образом, без дополнительного энергетического воздействия на поток: выбор материала поверхности с заданными свойствами [11], нанесение нерегулярной [12, 13] или регулярной [14, 15] шероховатости, а также использование податливых покрытий [16]. Однако одним из наиболее простых в реализации и перспективных методов управления является непрерывная тангенциальная инжекция жидкости вдоль поверхности тела обтекания с целью введения дополнительного импульса в пограничный слой для преодоления неблагоприятного градиента давления [17].

В данной статье изучается возможность управления динамикой кавитационных каверн, возникающих со стороны разрежения уменьшенной модели направляющей лопатки высоконапорной гидравлической турбины, посредством непрерывной тангенциальной инжекции жидкости через поперечный щелевой канал в поверхности. В основе исследования лежит анализ результатов высокоскоростной визуализации присоединенных каверн и сравнение распределений средней скорости и турбулентных характеристик течения вблизи гидрокрыла.

Условия эксперимента и методика измерений

Эксперименты проводились на кавитационном гидродинамическом стенде Института теплофизики СО РАН. Описание стенда, условий эксперимента и используемых методов измерений подробно изложено в [18]. Объектом исследования являлась уменьшенная модель направляющей лопатки (НЛ) высоконапорной турбины с длиной хорды $C=100$ мм, представляющая собой двумерное гидрокрыло, геометрия которого показана на рис. 1 и в таблице. Форма НЛ была максимально приближена к реальной: гидрокрыло имело тупую заднюю кромку высотой 1,3 мм (что является характерным для реальных лопаток) в отличие от предыдущего исследования [19], в котором рассматривалась НЛ с острой задней кромкой. Гидрокрыло было изготовлено из латуни со средним уровнем шероховатости поверхности около 1,5 мкм. Ось вращения НЛ располагалась на расстоянии 0,54C от передней кромки. Максимальная толщина НЛ составляла $H_{\max}=0,2206C$ на расстоянии $x_{\max}=0,4396C$ от ее передней кромки. Исследования были выполнены для углов атаки $\alpha=0, 3$ и 9° . Для достижения различных кавитационных режимов в экспериментах варьировалось число кавитации $\sigma=(p_{in}-p_v)/(\rho U_0^2/2)$, где p_{in} – давление на входе в ра-

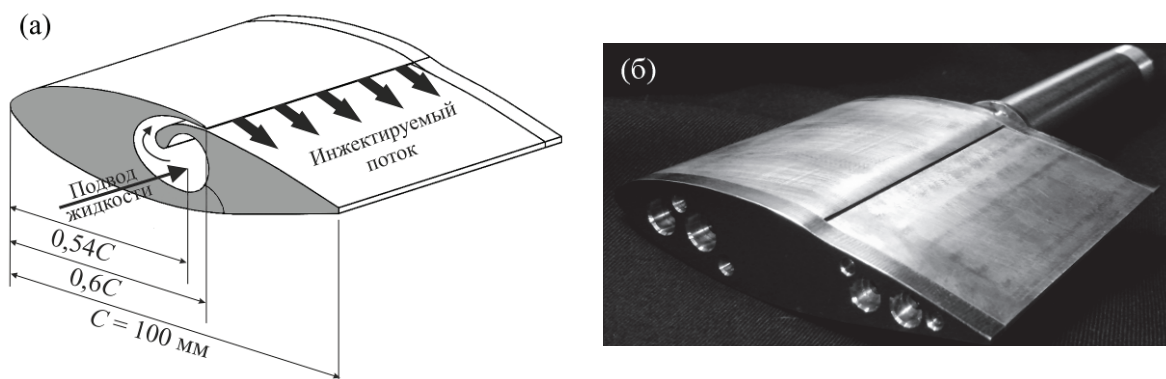


Рис. 1. (а) Трехмерная схема и (б) фотография собранной модели НЛ. Максимальная толщина НЛ составляет $H_{\max}/C=0,2206$ на расстоянии $x_{\max}/C=0,4396$ от передней кромки. Радиус округления носовой части – 1,97 мм, высота усеченной задней кромки – 1,3 мм

Fig. 1. (a) 3D scheme and (b) photograph of the fabricated guide vane (GV) model. The maximum GV thickness is $H_{\max}/C=0,2206$ at the distance of $x_{\max}/C=0,4396$ from its leading edge. The rounding radius of the leading edge is 1,97 mm, the height of the blunt trailing edge is 1,3 mm

бочий канал; p_v – давление насыщенных паров рабочей жидкости (дистиллированной воды); ρ – плотность рабочей жидкости, путем изменения средне-расходной скорости течения $U_0=Q/[a \cdot (b-h(\alpha))]$, где Q – объемный расход жидкости; $a=80$ мм и $b=250$ мм – ширина и высота рабочего канала; h – высота миделевого сечения лопатки – сечения, в котором проекция крыла на ось y , зависящая от угла атаки α , достигает максимального значения ($h=H_{\max}$ при $\alpha=0^\circ$). Соотношение размеров лопатки (отношение размаха гидропрофиля к его хорде) $a/C=0,8$, что хорошо соответствует некоторым практическим случаям.

Для управления течением исходная геометрия симметричного гидрокрыла была модифицирована таким образом, чтобы сформировать поперечный щелевой канал на одной из его сторон (верхней на рис. 2), являющийся выходным сечением сопла, расположенного внутри НЛ. Рабочая жидкость подавалась из байпасного контура напрямую во внутреннее сопло НЛ и далее через щелевой канал попадала в основной поток. Выходное сечение щелевого сопла высотой $h_n=0,6$ мм и шириной $a_n=70$ мм располагалось на расстоянии $0,6$ C от передней кромки крыла. Таким образом, инъекция жидкости осуществлялась по всему размаху лопатки за исключением торцевых накладок шириной по 5 мм каждая. Высота обратного уступа, формируемого щелевым каналом и его стенкой, составляла 0,8 мм. Камера сопла, расположенная внутри НЛ, имела спиралевидную геометрию с сужением к выходу (рис. 1, а). Коэффициент поджатия сопла (отношение площади входного сечения к площади выходного) равен 3,16. Подача жидкости к внутренней камере сопла осуществлялась через трубопровод с внутренним диаметром 13 мм, который пролегал внутри оси НЛ, посредством насоса или за счет существующего градиента давления вдоль байпасного контура. В экспериментах расход жидкости через щелевой канал не превышал 0,7 л/с,

что соответствовало максимальной скорости пристенной щелевой струи $U_{inj}=16,7$ м/с. Погрешность измерения расхода через щелевой канал составляла 2 %. В байпасном контуре забор жидкости производился выше по течению перед хонейкомбом основного контура экспериментального стенда. При этом жидкость из байпасного контура частично подавалась в рабочий канал, а оставшаяся ее часть возвращалась обратно в стенд перед входом в насосную группу, тем самым полный объем жидкости в стенде не изменялся.

Таблица. Точки образующей поверхности НЛ в различных поперечных сечениях x . y_{up} и y_{down} – поперечные координаты этих точек на верхней (с щелью) и нижней (без щели) поверхностях относительно хорды гидрокрыла (нулевая линия). Толщина НЛ в каждом сечении $H(x)=y_{up}-y_{down}$. Профиль модели НЛ получен путем аппроксимации кубическим сплайном этих значений

Table. Points of the generatrix of GV surface at different cross-sections x . y_{up} and y_{down} are the transversal coordinates of these points at the upper (with slot) and lower (w/o slot) surfaces with respect to the hydrofoil chord (zero line). The GV thickness in every cross-section is $H(x)=y_{up}-y_{down}$. The shape of the GV model is a result of a cubic spline approximation of these values

x/C	y_{up}/C	y_{down}/C
0	0	0
0,1	0,0658	-0,0658
0,2	0,0898	-0,0898
0,3	0,1045	-0,1045
0,4	0,1098	-0,1098
0,5	0,1087	-0,1087
0,6	0,0925/0,0845	-0,0981
0,7	0,0713	-0,0792
0,8	0,0544	-0,0554
0,9	0,0312	-0,0312
1	0,0065	-0,0065

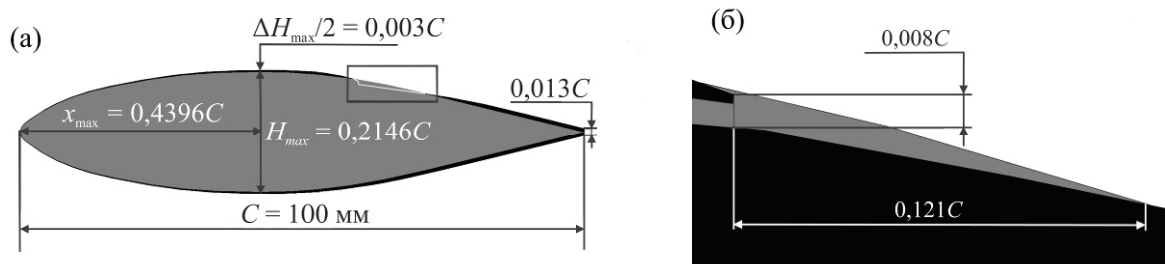


Рис. 2. Сравнение формы модифицированной модели НЛ (показана черным) с геометрией лопатки из работы [19] (изображена серым): (а) во весь размер и (б) увеличенная область вблизи щелевого канала, соответствующая выделенной области на изображении (а)

Fig. 2. Comparison of the shape of the modified GV model (painted black) with the geometry of the GV model from [19] (colored grey): (a) the full-length image and (b) the blow-up of the near-slot region corresponding to the box-shaped area in image (a)

В рамках данной постановки задачи определяющим параметром помимо угла атаки α и числа кавитации σ также является отношение скорости инжектируемой жидкости к скорости набегающего потока U_{inj}/U_0 . Этот параметр отражает способность генерируемой пристенной струи преодолеть положительный градиент давления, для этого $U_{inj}/U_0 \sim 1$. Вместе с тем в научно-технической литературе (например, [17]) для количественной оценки мощности управляющего потока обычно вводят коэффициент импульса струи C_μ , который, по сути, отражает затрачиваемое на генерацию струи количество энергии по отношению к энергии самого течения. В зависимости от параметров течения этот коэффициент может быть представлен в разной форме. В данном исследовании он был задан как отношение подводимого импульса через щелевой канал к импульсу, передаваемому гидрокрылу основным потоком вследствие его перекрытия, согласно следующей формуле:

$$C_\mu = \frac{m_{inj} U_{inj}}{m_0 U_0} = \frac{U_{inj}^2 S_N}{U_0^2 S_M} = \frac{U_{inj}^2 h_N a_N}{U_0^2 h a},$$

где m_{inj} – масса жидкости, истекающей из щелевого сопла с площадью выходного сечения S_N в единицу времени; m_0 – эквивалентная масса жидкости основного течения, которая протекала бы через площадь миделевого сечения крыла S_M в единицу времени в его отсутствие. В настоящей работе C_μ можно считать приблизительно равным $0,024 U_{inj}^2 / U_0^2$ для всех рассматриваемых углов атаки α ввиду их малости.

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 визуализации двумя CMOS-камерами Photron FASTCAM SA5 (разрядность 12 бит, разрешение 1024×1024 пикселей, частота регистрации 7 кГц) с частотой дискретизации 20 кГц одновременно из двух ортогональных положений – сверху и сбоку. Для равномерной подсветки области возникновения кавитации в качестве непрерывного источника некогерентного света использовались три галогеновые

лампы суммарной мощностью 2,5 кВт. Скорость течения измерялась с помощью PIV системы, состоящей из двойного импульсного твердотельного Nd: YAG-лазера Quantel EVG00200 (длина волны излучения 532 нм, частота генерации импульсов 15 Гц, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе 200 мДж), ПЗС-камеры ImperX B2020 (разрядность 14 бит, разрешение 2048×2048 пикселей, частота регистрации 6 Гц), оснащенной объективом Nikon AF Nikkor 50 mm f/1.4D и оптическим фильтром (край полосы пропускания на 570 нм), и генератора сигналов ПОЛИС (8 выходных TTL-каналов, частота повторения пар импульсов 10 Гц, минимальная задержка между импульсами в паре 100 нс) для синхронизации всех компонент измерительного комплекса. Измерительная система управлялась через ПК с применением программного пакета «ActualFlow» [20]. Поскольку в кавитирующем потоке паровые микропузырьки могут серьезно ухудшать качество исходных данных вследствие отражения лазерного излучения в камеру и формирования ярких бликов на изображениях, их негативное влияние на PIV-измерения в существенной степени подавлялось путем добавления в поток флуоресцентных трассеров (дисперсный состав 1–20 мкм, диапазон длин волн переизлучения 550–700 нм). Измерения производились с частотой регистрации 4 Гц. Толщина светового лазерного «ножа», используемого для засветки частиц, составляла 0,8 мм в измерительном сечении, которое совпадало с центральной продольной плоскостью рабочего канала. Расстояние между камерой и лазерным «ножом» было равно 574 мм. Размер измерительной области составлял 124×124 мм.

Исходные данные (серия из 5000 двойных PIV-изображений для каждого режима) подвергались последовательно двум процедурам предварительной обработки: вычитание среднего двухкадрового поля интенсивности, осредненное по всему размеру выборки, для улучшения качества изображений и маскирование для удаления областей, соответствующих положению гидрокрыла, и теней из последующих расчетов. Поля скорости рассчитывались с помощью итерационного кросскорреля-

ционного алгоритма с непрерывным смещением и деформацией областей и 75 % перекрытием между ними. На этапе корреляционной обработки изображений также учитывалась локальная концентрация трассирующих частиц. Для получения достаточно большого динамического диапазона по смещению частиц начальный размер расчетной области составлял 64×64 пикселя, но в процессе обработки для увеличения пространственного разрешения она последовательно дробилась, так что конечный размер элементарной расчетной ячейки был равен 8×8 пикселей. Полученные векторные поля мгновенной скорости подвергались последовательно трем процедурам валидации данных: валидация по соотношению сигнал/шум с порогом 2,0, адаптивный медианный фильтр с размером области 7×7 пикселей и кластерная валидация с коэффициентом 50 (детали обработки можно найти в [18]).

Результаты

В данном разделе представлены некоторые результаты экспериментального исследования кавитационного обтекания модифицированной модели НЛ в сравнении с немодифицированным гидрокрылом для углов атаки $\alpha = 3^\circ$ и 9° и нескольких режимов по числам кавитации: однофазный поток, пузырьковая/пленочная кавитация, переходный режим и нестационарная пульсирующая каверна. Сначала рассматривается эффект инъекции на пространственную структуру и размеры кавитационных каверн, зарегистрированный путем высокоскоростной визуализации. Далее приводится сравнение распределений средних скоростей и турбулентных характеристик на примере флуктуационной составляющей продольной компоненты скорости и напряжений Рейнольдса вблизи поверхности гидрокрыла для тех режимов, влияние инъекции на которых наиболее выражено.

Высокоскоростная визуализация

Малый угол атаки

При $\alpha = 3^\circ$ кавитация зарождается на стороне разрежения направляющей лопатки на расстоянии примерно 0,09 C от передней кромки в форме отдельных пузырьков, при $\sigma = 0,93$ область кавитации распространяется вниз по потоку до 0,7 C (рис. 3, а.2). В случае немодифицированной (стандартной) НЛ область кавитации практически совпадает с кавитационной областью на модифицированном гидрокрыле кроме пристенных зон, где кавитация на стандартном профиле полностью отсутствует (рис. 3, а.1, а.2). Максимальный размер кавитационных пузырей на стандартной НЛ оказывается заметно меньше (2 мм), чем на модифицированном гидрокрыле (7 мм). Это связано с тем, что начальное количество пузырей, а значит, и ядер кавитации в случае модифицированного гидрокрыла по неизвестной причине значительно меньше, чем в случае немодифицированного, поэтому до того, как начать влиять друг на друга, они

успевают достичь гораздо больших размеров, перемещаясь вниз по потоку. С началом инъекции жидкости с относительной скоростью струи $U_{inj}/U_0 = 0,64$ наблюдавшийся исходно переходный режим кавитационного обтекания, характеризующийся наличием большого количества кавитационных пузырей, которые растут вниз по потоку, взаимодействуют друг с другом, сливаются в более крупные структуры, но при достижении области повышенного давления схлопываются с образованием небольших облаков из микроскопических пузырей, переходит в обычную пузырьковую кавитацию (рис. 3, а.3). Как можно видеть, инъекция приводит к резкому сокращению зоны кавитации выше по течению в пределах от 0,09 C до 0,6 C и уменьшению количества и размера кавитационных пузырей с 7 до 4 мм, что, вероятно, связано с перераспределением давления на поверхности НЛ при инжестировании жидкости. Повышение скорости инжеструемой жидкости до $U_{inj}/U_0 = 1,25$ влечет интенсификацию парообразования (рис. 3, а.4), причем максимальный диаметр кавитационных пузырей, достигающий уже 10 мм, оказывается даже больше, чем при отсутствии инъекции, хотя режим обтекания остается пузырьковым.

Незначительное уменьшение σ до 0,87 приводит к тому, что присоединенная каверна как на модифицированной, так и на стандартной НЛ становится неустойчивой и начинает периодически пульсировать с безразмерной частотой $St = fC/U_0 = 0,17$ в случае свободного (т. е. без инъекции) потока (рис. 3, б.1, б.2). При этом размер зоны кавитации изменяется от нулевого, когда кавитация исчезает полностью, до 0,8 C , когда каверна достигает максимального размера, а кавитационные пузыри становятся совсем маленькими, не более 2–3 мм в поперечнике (рис. 3, а.1, б.1, б.2). На данном режиме низкоскоростная ($U_{inj}/U_0 < 1$) инъекция жидкости при $U_{inj}/U_0 = 0,73$ позволяет стабилизировать присоединенную каверну (рис. 3, б.3), одновременно с этим уменьшая зону кавитации до 0,65 C и увеличивая размер кавитационных пузырей до 8 мм. Таким образом, режим обтекания НЛ становится переходным, подобным тому, который представлен на рис. 3, а.2. Стоит заметить, что значение коэффициента C_μ в данном случае составляет всего лишь 0,013, что говорит о малости затрачиваемой энергии, используемой для управления течением, по сравнению с энергией самого течения. Увеличение U_{inj}/U_0 до 1,27 (рис. 3, б.4) уже не приводит к изменению режима кавитационного обтекания, он остается переходным, но несколько интенсифицирует парообразование (визуально это проявляется как расширение кавитационной области и увеличение концентрации паровой фазы в ней) и уменьшает размер пузырей до 4 мм. Следовательно, низкоскоростная инъекция на малых углах атаки оказывается более эффективной, чем высокоскоростная. При дальнейшем уменьшении числа кавитации σ до 0,81 активное воздействие больше не меняет картину течения (рис. 3, в.2, в.3, в.4), ка-

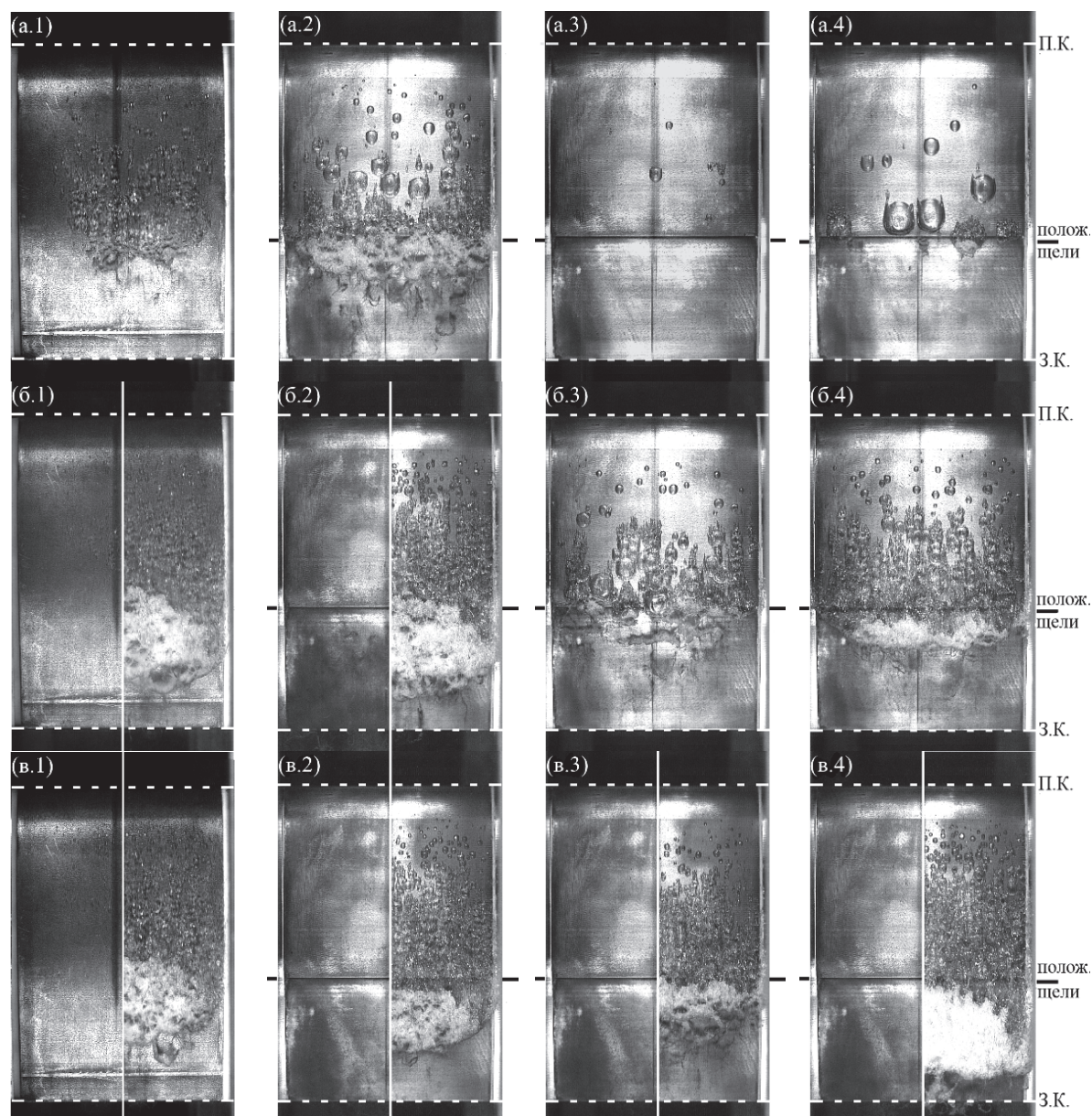


Рис. 3. Фотографии частичных каверн (вид сверху), возникающих на стороне разрежения (1) немодифицированной (без щели) и (2, 3, 4) модифицированной модели направляющей лопатки при $\alpha=3^\circ$ для следующих режимов обтекания: (а) $\sigma=0,93$ при (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,64$ ($C_\mu=0,01$) и (4) $U_{inj}/U_0=1,25$ ($C_\mu=0,038$) (переходный режим/пузырьковая кавитация), (б) $\sigma=0,87$ при (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,73$ ($C_\mu=0,013$) и (4) $U_{inj}/U_0=1,27$ ($C_\mu=0,039$) (нестационарная каверна/переходный режим) и (в) $\sigma=0,81$ при (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,74$ ($C_\mu=0,013$) и (4) $U_{inj}/U_0=1,24$ ($C_\mu=0,037$) (нестационарная каверна). Для нестационарных режимов обтекания 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 (как раз перед разрывом межфазной границы каверны). Направление потока сверху вниз

Fig. 3. Photographs of the partial cavities (top view) occurring on the suction side of the (1) unmodified (without the slot) and (2, 3, 4) modified guide vane model at $\alpha=3^\circ$ for the following flow conditions: (a) $\sigma=0,93$ when (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,64$ ($C_\mu=0,01$) and (4) $U_{inj}/U_0=1,25$ ($C_\mu=0,037$) (transitional regime/traveling bubbles), (b) $\sigma=0,87$ when (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,73$ ($C_\mu=0,013$) and (4) $U_{inj}/U_0=1,27$ ($C_\mu=0,039$) (unsteady cavity/transitional regime) and (c) $\sigma=0,81$ when (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,74$ ($C_\mu=0,013$) and (4) $U_{inj}/U_0=1,24$ ($C_\mu=0,037$) (unsteady cavity). For the unsteady flow conditions, half images indicating two phases of the attached cavity evolution when it has (left) the shortest (at the moment whereupon the cavity starts to grow) and (right) longest length (just before the cavity interface breakup) are shown together in the same picture. The flow direction is from the top

верна остается нестационарной ($St=0,17$), хотя размер зоны кавитации немного уменьшается с $0,8 C$ до $0,7 C$ для $U_{inj}/U_0=0,74$ ($C_\mu=0,013$) и увеличивается до $0,9 C$ для $U_{inj}/U_0=1,24$ ($C_\mu=0,037$).

Большой угол атаки

При большом угле атаки $\alpha=9^\circ$ при отсутствии инъекции кавитация зарождается сразу за передней кромкой НЛ в виде паровой пленки. При $\sigma=2,24$ длина присоединенной каверны $L_c/C=0,13$ для обоих гидрокрыльев, стандартного и модифицированного (рис. 4, а.1, а.2). С началом инъекции длина присоединенной каверны быстро уменьшается по мере роста скорости инжектируемой жидкости и полностью исчезает при $U_{inj}/U_0=0,04$ ($C_\mu=4 \cdot 10^{-5}$) (рис. 4, а.3). Такую высокую чувствительность каверны к инъекции и ее anomальное поведение на данном режиме в рамках данного исследования полностью объяснить не представляется возможным, требуются дополнительные дан-

ные о колебаниях давления в камере сопла, информация о распределении давления на поверхности лопаток, скоростная визуализация развития пристенной струи и другие. Это выходит за рамки данной работы, поэтому здесь приводится лишь описание наблюдаемых эффектов и некоторые рассуждения феноменологического характера. Весьма вероятно, что такой характер изменения длины каверны при малых расходах через щель связан с периодическим запиранием инжекционного потока в сопле при малых расходах, то есть происходит переход к так называемому пульсирующему режиму истечения струи. Это приводит к генерации волн давления/разрежения, которые, распространяясь вверх по потоку, нарушают стационарные условия течения вблизи передней кромки крыла, необходимые для зарождения присоединенной каверны [10], и тем самым препятствует ее образованию, что косвенно подтверждается увеличением амплитуды турбулентных флуктуаций скорости (следующий подраздел).

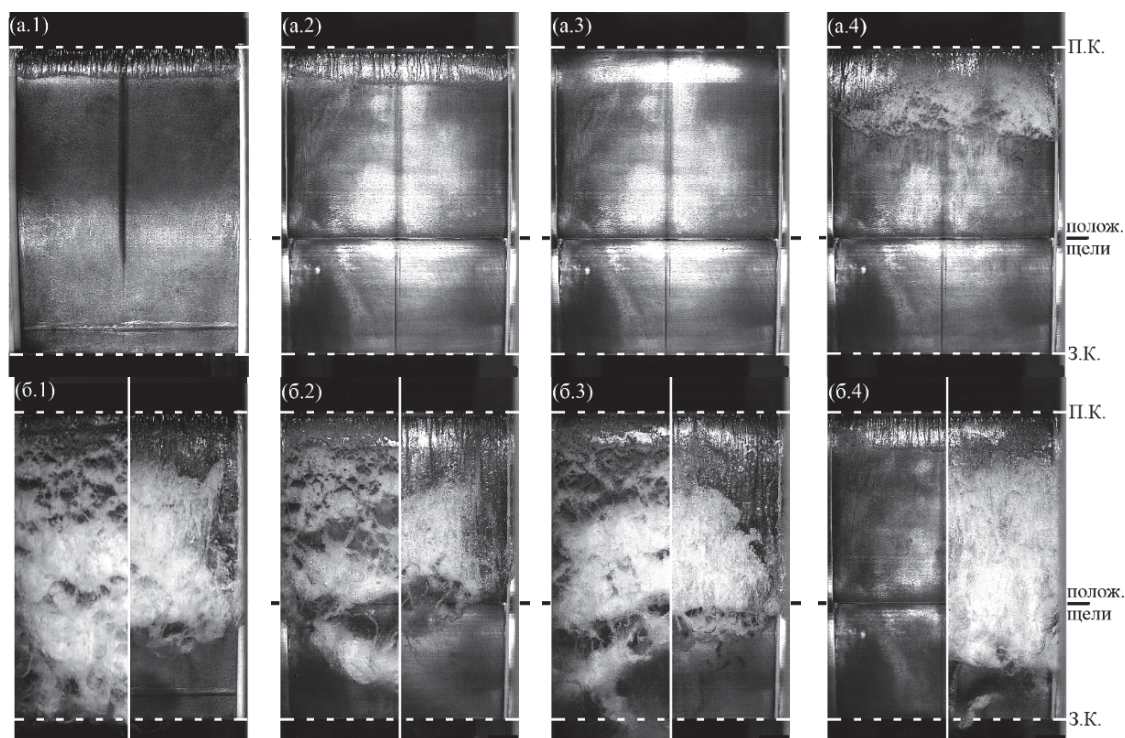


Рис. 4. Фотографии частичных каверн (вид сверху), возникающих на стороне разрежения (1) немодифицированной (без щели) и (2, 3, 4) модифицированной модели направляющей лопатки при $\alpha=9^\circ$ для следующих режимов обтекания: (а) $\sigma=2,24$ при (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) и (4) $U_{inj}/U_0=1,55$ ($C_\mu=0,058$) (пленочная каверна/докавитационный режим) и (б) $\sigma=1,57$ при (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,88$ ($C_\mu=0,019$) и (4) $U_{inj}/U_0=1,42$ ($C_\mu=0,048$) (нестационарная каверна). Для нестационарных режимов обтекания 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. 4. Photographs of the partial cavities (top view) occurring on the suction side of the (1) unmodified (without the slot) and (2, 3, 4) modified guide vane model at $\alpha=9^\circ$ for the following flow conditions: (a) $\sigma=2,24$ when (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) and (4) $U_{inj}/U_0=1,55$ ($C_\mu=0,058$) (sheet cavity/subcavitating flow) and (b) $\sigma=1,57$ when (2) $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$), (3) $U_{inj}/U_0=0,88$ ($C_\mu=0,019$) and (4) $U_{inj}/U_0=1,42$ ($C_\mu=0,048$) (unsteady cavity). For the unsteady flow conditions, half images indicating two phases of the attached cavity evolution when it has (left) the shortest (at the moment whereupon the cavity starts to grow) and (right) longest length (just before the cavity interface breakup) are shown together in the same picture. The flow direction is from the top

Дальнейший рост скорости инъекции не меняет картины течения до тех пор, пока не достигается порогового значения $U_{inj}/U_0=0,7$ ($C_\mu=0,011$). При его достижении пленочная каверна появляется снова, а ее длина возрастает по мере увеличения подводимого импульса: при $U_{inj}/U_0=1,07$ ($C_\mu=0,027$) (не показано) и $U_{inj}/U_0=1,55$ ($C_\mu=0,057$) (рис. 4, а,4), $L_c/C=0,28$ и $0,4$ соответственно. По-видимому, такой скорости инжектирования оказывается достаточно, чтобы запирания потока через щель больше не происходило, а условия обтекания гидрокрыла стали постоянными. Вместе с тем известно [21], что источник, расположенный ниже по течению за каверной, приводит к сокращению длины каверны, а сток – к ее удлинению. В данном случае струя жидкости со скоростью ниже локальной скорости течения вблизи поверхности подтормаживает основной поток вблизи места истечения струи и может служить аналогом источника. Замедление течения, в свою очередь, приводит к повышению локального давления и, следовательно, вызывает перераспределение давления на всей поверхности НЛ, что и вызывает уменьшение длины каверны или полное ее исчезновение. Струя же, имеющая скорость выше локальной, ускоряет слои жидкости, лежащие перед щелью, за счет эжекции подобно стоку. Таким образом, высокоскоростная инъекция вызывает снижение давления в области расположения щели и, как следствие, приводит к росту каверны.

В случае нестационарной облачной кавитации при $\sigma=1,57$ (характерное число Струхала $St=0,43$) инъекция не позволяет эффективно воздействовать на кавитацию и хотя бы отчасти сократить длину присоединенной каверны (рис. 4, б). Напротив, она приводит к увеличению каверны: без инъекции минимальная и максимальная длина каверны L_c^{max}/C и L_c^{min}/C составляют 0,56 и 0,05 соответственно (рис. 4, б-2), для $U_{inj}/U_0=0,88$ ($C_\mu=0,018$) $L_c^{max}/C=0,68$ и $L_c^{min}/C=0,03$ (рис. 4, б-3) и для $U_{inj}/U_0=1,42$ ($C_\mu=0,048$) $L_c^{max}/C=0,83$ и $L_c^{min}/C=0,08$ (рис. 4, б-4). Так как каверна накрывает щелевое сопло, описывать влияние пристенной струи на каверну по аналогии с источником-стоком нельзя. Постепенное удлинение каверны с ростом скорости инжектирования, вероятно, связано с увеличением эффективной толщины гидрокрыла ниже по потоку относительно щели за счет пристенной струи и, как следствие, постепенным уменьшением скачка давления на щели с ростом U_{inj}/U_0 . Так происходит потому, что поперечный размер пристенного слоя, подпитываемого дополнительным импульсом, на больших углах атаки оказывается существенно меньше толщины кавитационной каверны, вследствие чего возвратное течение, являющееся причиной неустойчивости каверны, продолжает существовать над пристенной струей. В случае без инъекции скачок давления на щели не позволяет развиться каверне ниже по потоку относительно положения щели.

Распределения скорости

На рис. 5 и 6 представлены распределения продольной компоненты осредненной по времени скорости в виде дефекта скоростей $(U-U_0)/U_0$, продольной компоненты флуктуационной составляющей скорости $\tilde{u}/U_0$ (среднеквадратичные значения) и напряжений Рейнольдса $\langle uv \rangle/U_0^2$ в нескольких поперечных относительно направления течения сечениях вдоль образующей поверхности гидрокрыла, спроецированной на его хорду. Таким образом, ось x получается направленной вдоль течения вне зависимости от угла атаки α , а ось y всегда перпендикулярна направлению течения, но в каждом сечении $y/C=0$ соответствует точке на верхней (с щелью) поверхности НЛ. Начало координат ($x/C=0$; $y/C=0$) соответствует положению передней кромки НЛ в измерительной плоскости при угле атаки $\alpha=0^\circ$. Щелевой канал находится в точке ($x/C=0,6$; $y/C=0$). Для облегчения прямого сравнения профили представлены вместе для обеих модификаций НЛ и разных U_{inj}/U_0 на всех рассматриваемых режимах. Характерные межфазные границы присоединенных каверн, полученные из визуальных данных, отображены на графиках в виде пунктирных линий для различных скоростей инъекции. Как и ожидалось, инъекция практически не оказывает влияния на профили как средней и флуктуационной компонент скорости, так и напряжений Рейнольдса выше по течению относительно положения щелевого канала (профили в сечениях $x/C=0,1$ и $0,4$ на рис. 5, 6). Данный факт подтверждает сделанный ранее вывод по визуальным данным, что взаимодействие кавитационной каверны и пристенной струи выше по течению относительно положения щели происходит только за счет изменения локального поля давления и не зависит от распределений скоростных характеристик.

Малый угол атаки

В докавитационном случае ($\sigma=1,26$) при $\alpha=3^\circ$ интенсивность турбулентных флуктуаций скорости в пограничном слое неожиданно оказывается выше более чем на 60 % для стандартной НЛ ($\tilde{u}/U_0=0,176$ в точке $x/C=1$, $y/C=0,023$), чем для модифицированной без инъекции ($\tilde{u}/U_0=0,108$ в той же точке) (рис. 5, б.1), хотя модифицированное крыло имеет, очевидно, менее обтекаемую форму. Судя по всему, данное обстоятельство обусловлено различием геометрии задней части двух лопаток (рис. 2, а). В самом деле, для модифицированного гидрокрыла после отрыва пограничного слоя при прохождении обратного уступа, формируемого щелью и поверхностью НЛ, происходит повторное его присоединение ниже по течению. Однако вследствие того, что толщина задней кромки для модифицированной НЛ оказывается больше (между сечениями $x/C=0,721$ и 1 , рис. 2), а, следовательно, неблагоприятный градиент давления в данной области меньше, турбулизация пограничного слоя на ней происходит медленнее.

Малая скорость инжекции $U_{inj}/U_0=0,64$ ($C_\mu=0,01$) приводит к заметному увеличению модуля дефекта средней скорости вблизи задней кромки крыла ($x/C=1$) до $|(U-U_0)/U_0|=0,85$ по сравнению с безынекционным случаем ($|(U-U_0)/U_0|=0,59$), так что их разница $\Delta U/U_0=0,26$ (рис. 5, а.1), хотя толщина пограничного слоя не изменяется и составляет приблизительно $0,05 C$. Вместе с тем при инжекции происходит более чем двукратный рост турбулентных флуктуаций скорости в том же поперечном сечении до $\tilde{u}/U_0=0,23$ на расстоянии $y/C=0,024$ от поверхности НЛ (рис. 5, б.1), причем вблизи стенки их амплитуда изменяется не столь значительно. Аналогично ведут себя и касательные напряжения, увеличиваясь более чем в два раза на расстоянии $y/C=0,024$ от поверхности НЛ и практически совпадая на стенке в случае инжектирования с малой скоростью (рис. 5, в.1). Увеличение скорости инжекции до $U_{inj}/U_0=1,32$ ($C_\mu=0,042$) влечет за собой изменение пространственных распределений скоростных характеристик, так что они становятся более равномерными по сравнению со случаем без инжекции. В сечении $x/C=1$ $|(U-U_0)/U_0|$ уменьшается с $0,61$ до $0,32$ вблизи поверхности НЛ (рис. 5, а.1), а интенсивность турбулентных флуктуаций скорости и амплитуда напряжений Рейнольдса падают почти в два раза в пределах пограничного слоя (рис. 5, б.1, в.1).

На переходном режиме ($\sigma=0,93$) в случае стандартной НЛ распределения скоростных характеристик слабо отличаются от докавитационного случая. Однако для модифицированной НЛ происходят существенные изменения в распределениях средних и турбулентных характеристик вблизи стенки даже для невозмущенного потока (без инжекции). Так, увеличивается толщина пограничного слоя с $0,03 C$ в сечении $x/C=0,7$ и $0,06 C$ при $x/C=1$ (докавитационный поток, рис. 5, а.1) до $0,04 C$ и $0,09 C$ соответственно в тех же сечениях (рис. 5, а.2). Средняя скорость оказывается заметно меньше в пристенной области ($y/C<0,05$) в сравнении с докавитационным режимом, так что ее минимум достигает $U^{\min}/U_0=0,43$ при $x/C=0,7$ и $U^{\min}/U_0=0,28$ при $x/C=1$. Турбулентные флуктуации одновременно с этим возрастают в пределах пограничного слоя до $\tilde{u}/U_0=0,21$ ($x/C=0,7$) и $0,17$ ($x/C=1$) (рис. 5, б.2). Напряжения Рейнольдса предсказуемо остаются отрицательными, но возрастают по амплитуде в пределах пограничного слоя до $\langle uv \rangle/U_0^2=-0,022$ ($x/C=0,7$) и $-0,01$ ($x/C=1$) (рис. 5, в.2).

Как уже отмечалось ранее, инжекция с малой скоростью $U_{inj}/U_0=0,64$ ($C_\mu=0,01$) на данном режиме течения вызывает изменение типа кавитации на пузырьковый (рис. 3, а.2, а.3). При этом в сравнении с безынекционным случаем происходит сокращение толщины пограничного слоя до $0,025C$ ($x/C=0,7$) и $0,05C$ ($x/C=1$) (рис. 5, а.2), смещение максимума флуктуаций скорости и минимума напряжений Рейнольдса от $y/C=0,015$ в сече-

нии $x/C=0,7$ к поверхности ($y/C=0$) и уменьшение их амплитуды до $\tilde{u}/U_0=0,12$ и $\langle uv \rangle/U_0^2=-0,005$ (рис. 5, б.2, в.2). При $x/C=1$ соответствующие максимум и минимум также оказываются рядом с поверхностью, но их значения остаются практически такими же, как и в случае без инжекции: $\tilde{u}/U_0=0,2$ и $\langle uv \rangle/U_0^2=-0,01$ (рис. 5, б.2, в.2). Эффект увеличения скорости инжекции до $U_{inj}/U_0=1,25$ ($C_\mu=0,038$) оказывается совсем незначительным в сечении $x/C=0,7$ в сравнении с предыдущим случаем. Однако в то же время в сечении $x/C=1$ увеличение U_{inj}/U_0 приводит к уменьшению модуля дефекта скорости у поверхности НЛ с $|(U-U_0)/U_0|=0,92$ для немодифицированного гидрокрыла до $0,45$, а также падению уровня турбулентных флуктуаций скорости и касательных напряжений в точке ($x/C=1$; $y/C=0,03$) более чем в два раза.

В случае нестационарного кавитационного обтекания при $\sigma=0,87$ (рис. 5, а.3) и $\sigma=0,81$ (рис. 5, а.4) толщина пограничного слоя для всех рассматриваемых случаев возрастает до $0,05C$ при $x/C=0,7$ и $0,11C$ при $x/C=1$. Причем подвод дополнительного импульса не оказывает влияния на поперечный размер пограничного слоя, но приводит к некоторому уменьшению средней скорости внутри него, особенно при слабой инжекции $U_{inj}/U_0=0,73$ ($C_\mu=0,013$). В результате вблизи стенки U/U_0 уменьшается на $0,4$ при $x/C=0,7$ и $0,1$ при $x/C=1$ для $\sigma=0,87$ и на $0,21$ и $0,15$ в тех же сечениях для $\sigma=0,81$ (рис. 5, а.3, а.4). Тем не менее, в целом можно констатировать, что при переходе к нестационарным режимам обтекания распределения средней скорости для стандартной и модифицированной НЛ близки (рис. 5, а.3, а.4), однако этого нельзя сказать о турбулентных характеристиках (рис. 5, б.3, б.4, в.3, в.4).

Так, при $\sigma=0,87$ в случае модифицированной лопатки без инжекции амплитуда флуктуаций скорости оказывается больше ($\tilde{u}/U_0=0,22$ при $x/C=1$), чем для стандартной НЛ с острой задней кромкой и модифицированной НЛ с инжекцией ($\tilde{u}/U_0 \approx 0,15$) в том же сечении (рис. 5, б.3). В такой ситуации инжекция позволяет лишь приблизиться к характеристикам для немодифицированной НЛ, но не превзойти их. Тем не менее, на этом режиме инжекции оказывается достаточно, чтобы изменить распределение давления на поверхности лопатки и, тем самым, инициировать возврат к стационарному режиму течения (рис. 3, б.3, б.4). При $\sigma=0,81$ инжекция не позволяет даже хоть сколько-нибудь близко подойти к распределениям вблизи стандартной НЛ, эффект инжекции на данном режиме также не просматривается и на визуальных данных (рис. 3, в.3, в.4). Для немодифицированного крыла $\tilde{u}/U_0=0,12$ в сечении $x/C=1$, тогда как для гидропрофиля с щелью $\tilde{u}/U_0=0,18$ независимо от скорости инжекции (рис. 5, б.4). Распределения напряжений Рейнольдса в целом повторяют с точностью до знака динамику интенсивности турбулентности (рис. 5, в.4).

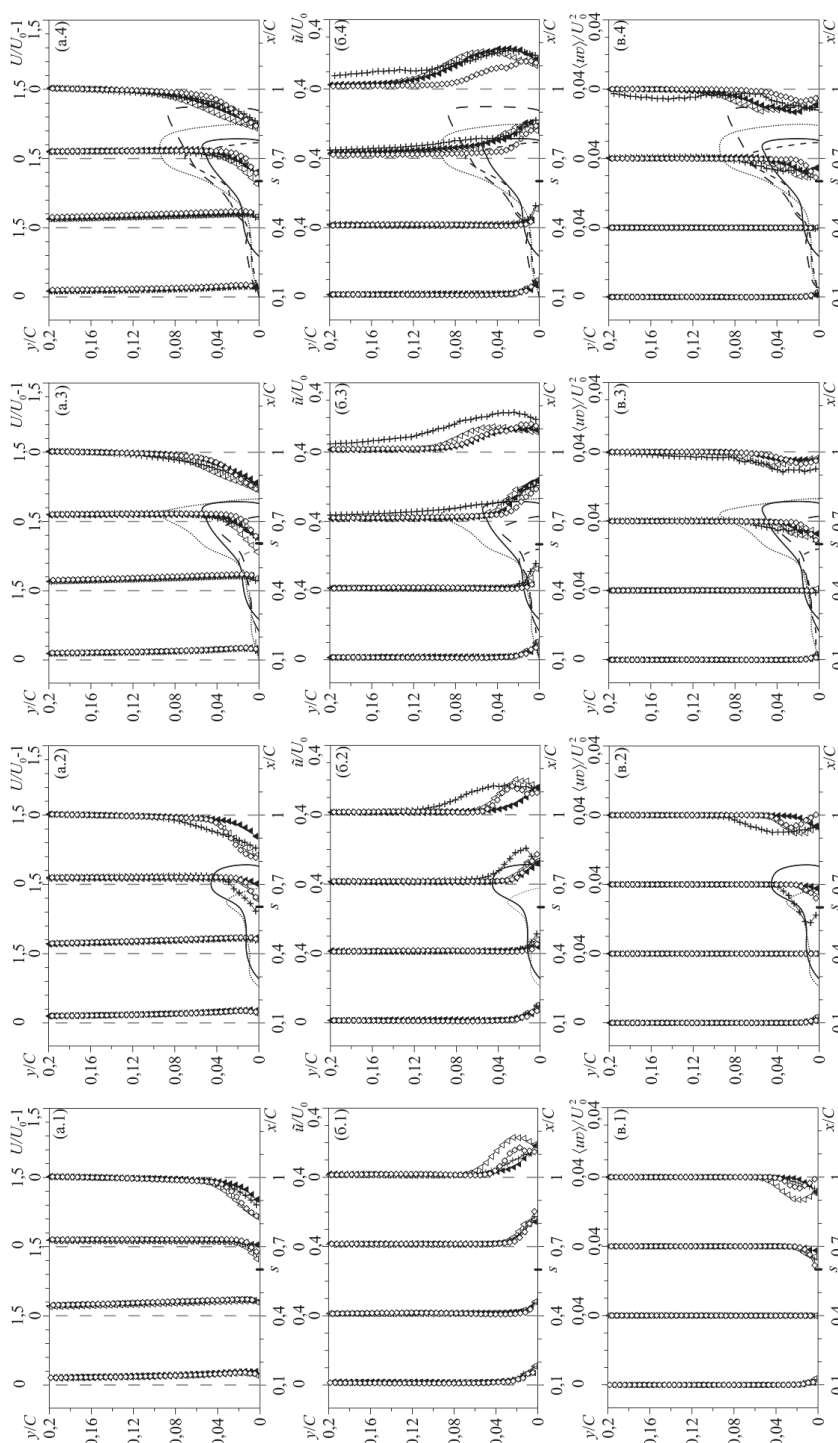


Рис. 5.

Эволюция продольной составляющей (а) средней скорости (в виде дефекта скорости) и (б) интенсивности турбулентности (среднеквадратичные значения) и (в) напряжений Рейнольдса вниз по потоку со стороны разрежения модели направляющей лопатки при $\alpha=3^\circ$ для следующих режимов обтекания: (1) $\sigma=1,26$ при (Δ) $U_{inf}/U_0=0,64$ ($C_{tr}=0,01$) и $(\blacktriangle)$ $U_{inf}/U_0=1,32$ ($C_{tr}=0,042$) (докавитационный режим), (2) $\sigma=0,93$ при (Δ) $U_{inf}/U_0=0,64$ ($C_{tr}=0,01$) и $(\blacktriangle)$ $U_{inf}/U_0=1,25$ ($C_{tr}=0,038$) (переходный режим/пузырьковая кавитация), (3) $\sigma=0,87$ при (Δ) $U_{inf}/U_0=0,73$ ($C_{tr}=0,013$) и $(\blacktriangle)$ $U_{inf}/U_0=1,27$ ($C_{tr}=0,039$) (нестационарная каверна/переходный режим) и (4) $\sigma=0,81$ при (Δ) $U_{inf}/U_0=0,74$ ($C_{tr}=0,013$) и $(\blacktriangle)$ $U_{inf}/U_0=1,24$ ($C_{tr}=0,037$) (нестационарная каверна). Символы ($\blacklozenge$) соответствуют безынжекционному случаю, ($\diamond$) показывают распределения для немодифицированной НЛ. Сплошная и пунктирные линии отображают межфазные границы присоединенных каверн максимального размера: точки (.....) – $U_{inf}/U_0=0$ для всех режимов, на которых существует каверна, короткие штрихи (---) – $U_{inf}/U_0=0,73$ и $0,74$ ($C_{tr}=0,013$) при $\sigma=0,87$ и $0,81$, длинные штрихи (---) – $U_{inf}/U_0=1,27$ и $1,24$ ($C_{tr}=0,039$ и $0,037$) при $\sigma=0,87$ и $0,81$, сплошная линия (—) соответствует НЛ без модификации. s обозначает положение щелевого канала на поверхности гидрокрыла. Направление потока слева направо

Fig. 5.

Downstream evolution of the streamwise component of (a) the mean velocity (in the form of velocity defect), (б) turbulence intensity (r.m.s. values) and (в) the Reynolds stresses over the suction side of the guide vane model at $\alpha=3^\circ$ for the following flow conditions: (1) $\sigma=1,26$ when (Δ) $U_{inf}/U_0=0,64$ ($C_{tr}=0,01$) and $(\blacktriangle)$ $U_{inf}/U_0=1,32$ ($C_{tr}=0,042$) (subcavitating flow), (2) $\sigma=0,93$ when (Δ) $U_{inf}/U_0=0,64$ ($C_{tr}=0,01$) and $(\blacktriangle)$ $U_{inf}/U_0=1,25$ ($C_{tr}=0,038$) (transitional regime/traveling bubbles), (3) $\sigma=0,87$ when (Δ) $U_{inf}/U_0=0,73$ ($C_{tr}=0,013$) and $(\blacktriangle)$ $U_{inf}/U_0=1,27$ ($C_{tr}=0,039$) (unsteady cavity/transitional regime) and (4) $\sigma=0,81$ when (Δ) $U_{inf}/U_0=0,74$ ($C_{tr}=0,013$) and $(\blacktriangle)$ $U_{inf}/U_0=1,24$ ($C_{tr}=0,037$) (unsteady cavity). Symbols ($\blacklozenge$) correspond to the regime without injection, ($\diamond$) show the distributions for the GV without modification. The solid and broken curves represent interfaces of the sheet cavities when they reach their maximum size: dots (.....) – $U_{inf}/U_0=0$ for all the regimes when the cavity exists, short dashes (---) – $U_{inf}/U_0=0,73$ and $0,74$ ($C_{tr}=0,013$) when $\sigma=0,87$ and $0,81$, long dashes (---) – $U_{inf}/U_0=1,27$ and $1,24$ ($C_{tr}=0,039$ and $0,037$) when $\sigma=0,87$ and $0,81$, solid line (—) corresponds to the unmodified GV. s denotes the position of the slot channel in the foil surface. The flow direction is from the left

Большой угол атаки

Как и для угла атаки в 3° , при $\alpha=9^\circ$ в случае докавитационного потока ($\sigma=2,83$) (рис. 6, а.1, б.1, в.1) и при пленочной кавитации ($\sigma=2,24$) (рис. 6, а.2, б.2, в.2) инъекция жидкости с малыми $U_{inj}/U_0=0,21$

($C_\mu=0,001$) и высокими $U_{inj}/U_0=1,66$ ($C_\mu=0,066$) и $1,55$ ($C_\mu=0,058$) скоростями приводит соответственно к повышению и снижению интенсивности турбулентности в пограничном слое. В то же время выше было показано, что высокоскоростная ин-

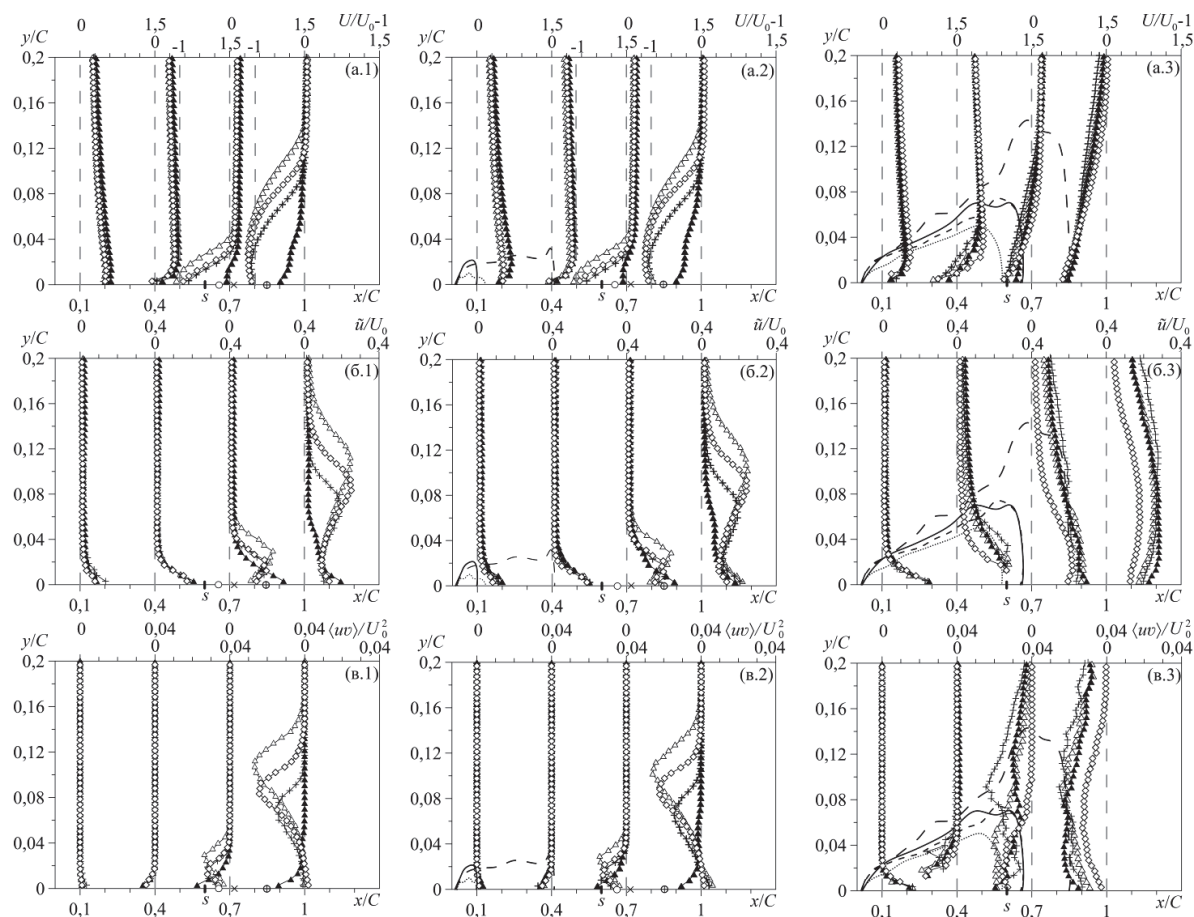


Рис. 6. Эволюция продольной составляющей (а) средней скорости (в виде дефекта скорости), (б) интенсивности турбулентности (среднеквадратичные значения) и (в) напряжений Рейнольдса вниз по потоку со стороны разрежения модели направляющей лопатки при $\alpha=9^\circ$ для следующих режимов обтекания: (1) $\sigma=2,83$ при (Δ) $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) и ($\blacktriangle$) $U_{inj}/U_0=1,66$ ($C_\mu=0,066$) (докавитационный режим), (2) $\sigma=2,24$ при (Δ) $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) и ($\blacktriangle$) $U_{inj}/U_0=1,55$ ($C_\mu=0,058$) (пленочная каверна/докавитационный режим) и (3) $\sigma=1,57$ при (Δ) $U_{inj}/U_0=0,88$ ($C_\mu=0,019$) и ($\blacktriangle$) $U_{inj}/U_0=1,42$ ($C_\mu=0,048$) (нестационарная каверна). Символы ($\circ$) соответствуют безыножекционному случаю, ($\diamond$) показывают распределения для немодифицированной НЛ. Сплошная и пунктирные линии отображают межфазные границы присоединенных каверн максимального размера: точки (.....) – $U_{inj}/U_0=0$ для всех режимов, на которых существует каверна, короткие штрихи (---) – $U_{inj}/U_0=0,88$ ($C_\mu=0,019$) при $\sigma=1,57$, длинные штрихи (---) – $U_{inj}/U_0=1,55$ и $1,42$ ($C_\mu=0,058$ и $0,048$) при $\sigma=2,24$ и $1,57$, сплошная линия (—) соответствует НЛ без модификации. Положения отрыва потока отмечены символом ($\otimes$) при $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$) и ($\circ$) при $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) для $\sigma=2,83$ и $2,24$, символ ($\blacksquare$) соответствует положению отрыва на аналогичных режимах для немодифицированной НЛ. s обозначает положение щелевого канала на поверхности гидрокрыла. Направление потока слева направо

Fig. 6. Downstream evolution of the streamwise component of (a) the mean velocity (in form of the velocity defect), (b) turbulence intensity (r.m.s. values) and (v) the Reynolds stresses over the suction side of the guide vane model at $\alpha=9^\circ$ for the following flow conditions: (1) $\sigma=2,83$ when (Δ) $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) and ($\blacktriangle$) $U_{inj}/U_0=1,66$ ($C_\mu=0,066$) (subcavitating flow), (2) $\sigma=2,24$ when (Δ) $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) and ($\blacktriangle$) $U_{inj}/U_0=1,55$ ($C_\mu=0,058$) (sheet cavity/subcavitating flow) and (3) $\sigma=1,57$ when (Δ) $U_{inj}/U_0=0,88$ ($C_\mu=0,019$) and ($\blacktriangle$) $U_{inj}/U_0=1,42$ ($C_\mu=0,048$) (unsteady cavity). Symbols ($\circ$) correspond to the regime without injection, ($\diamond$) show the distributions for the GV without modification. The solid and broken curves represent interfaces of the sheet cavities when they reach their maximum size: dots (.....) – $U_{inj}/U_0=0$ for all the regimes when the cavity exists, short dashes (---) – $U_{inj}/U_0=0,88$ ($C_\mu=0,019$) when $\sigma=1,57$, long dashes (---) – $U_{inj}/U_0=1,55$ and $1,42$ ($C_\mu=0,058$ and $0,048$) for $\sigma=2,24$ and $1,57$, solid line (—) corresponds to the unmodified GV. The location of flow separation is marked by symbol ($\otimes$) when $U_{inj}/U_0=0$ ($C_\mu=0$) and ($\circ$) when $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) for $\sigma=2,83$ and $2,24$, symbol ($\blacksquare$) corresponds to similar regimes for the unmodified GV. s denotes the position of the slot channel in the foil surface. The flow direction is from the left

жекция оказывается неэффективной для подавления кавитации (рис. 4). Ранее в работе [19] было обнаружено, что при угле атаки $\alpha=9^\circ$ на стандартной НЛ происходит отрыв потока от ее поверхности в сечении $x/C=0,72$. Отрыв пограничного слоя для модифицированной НЛ без инъекции располагается ниже по течению при $x/C=0,85$ вследствие различия задних частей двух гидрокрыльев. Высокоскоростная инъекция, как оказалось, позволяет сдвинуть точку отрыва потока к задней кромке НЛ, тогда как низкоскоростная инъекция смещает отрыв в обратную сторону, вверх по потоку до $x/C=0,66$. Возвратное течение можно распознать на тех графиках, где дефект скорости $(U-U_0)/U_0 < -1$ (рис. 6, а.1, а.2).

Отрыв пограничного слоя существенно изменяет структуру потока над поверхностью НЛ. Для низко- и высокоскоростной инъекции происходит расширение и сужение пограничного слоя соответственно. Например, вблизи задней кромки НЛ ($x/C=1$) его ширина становится равной $0,14C$ и $0,07C$, тогда как в невозмущенном случае она равняется $0,1C$ (рис. 6, а.1, а.2). При $U_{inj}/U_0=0,21$ ($C_\mu=0,001$) амплитуда турбулентных флуктуаций и напряжений Рейнольдса в том же сечении увеличивается с $\tilde{u}/U_0=0,19$ на расстоянии от поверхности $y/C=0,07$ (невозмущенный поток) до $\tilde{u}/U_0=0,25$ и с $\langle uv \rangle/U_0^2=-0,015$ до $-0,026$, а положение этого максимума и минимума смещается дальше от крыла ($y/C=0,11$). И, наоборот, при $U_{inj}/U_0=1,66$ и $1,55$ ($C_\mu=0,066$ и $0,058$) амплитуды $\tilde{u}/U_0$ и $\langle uv \rangle/U_0^2$ соответственно уменьшаются до $0,02$ и $0,001$ при $y/C=0,11$, а их максимум ($\tilde{u}/U_0=0,19$) и минимум ($\langle uv \rangle/U_0^2=-0,014$) достигаются вблизи самой кромки НЛ ($y/C=0,005$) (рис. 6, б.1, б.2, в.1, в.2). Несмотря на то, что низкоскоростная инъекция приводит к интенсификации турбулентности в пограничном слое вследствие, как говорилось выше, перехода пристенной струи в пульсирующий режим, она позволяет полностью подавить кавитацию вблизи передней кромки крыла (рис. 4, а).

В случае облачной кавитации (рис. 4, б) при $\sigma=1,57$ ни форма гидрокрыла, ни инжектирование жидкости не оказывают выраженного влияния на графики средней скорости течения (рис. 6, а.3). Однако отличие заметно в распределениях турбулентных характеристик для модифицированной и стандартной НЛ. Амплитуда турбулентных пульсаций и напряжений Рейнольдса оказывается примерно в полтора–два раза ниже для немодифицированного гидрокрыла ($\tilde{u}^{max}/U_0=0,17$ и $\langle uv \rangle^{max}/U_0^2=-0,013$), чем для НЛ со щелью при различных условиях инжектирования ($\tilde{u}^{max}/U_0=0,26$ и $\langle uv \rangle^{max}/U_0^2=-0,017$). Это подтверждает вывод, полученный из визуальных наблюдений, о том, что на режиме облачной кавитации инъекция почти не изменяет картину кавитационного обтекания. Следовательно, на нестационарных режимах при относительно больших углах атаки данный метод активного управления динамикой кавитационных каверн является неэффективным.

Заключение

В проведенном с помощью высокоскоростной визуализации и метода PIV исследовании была экспериментально изучена возможность и представлена оценка эффективности метода активного управления кавитирующим потоком, основанном на непрерывной тангенциальной инъекции жидкости через поперечный щелевой канал в поверхности уменьшенной модели НЛ высоконапорной турбины. Эксперименты были проведены для различных режимов обтекания, начиная с докавитационного и заканчивая нестационарными режимами с развитой кавитационной каверной, при трех углах атаки $\alpha=0, 3$ и 9 градусов. Коэффициент импульса струи C_μ в данной работе не превышал $0,066$, что говорит о малости затрачиваемой энергии, используемой для управления течением, по сравнению с энергией основного потока. В частности в исследовании особое внимание было уделено влиянию инъекции на зарождение и развитие кавитации, а также изменению пространственной структуры присоединенной каверны и режима кавитационного обтекания вследствие генерации пристенной струи с разными скоростями U_{inj}/U_0 . Прямое сравнение измеренных распределений средней скорости и турбулентных характеристик на примере флуктуационной компоненты скорости и напряжений Рейнольдса в окрестности модели НЛ с щелью и немодифицированной модели НЛ с острой задней кромкой позволило выявить ряд особенностей данных течений, связанных с различием формы гидрокрыльев и инжектированием жидкости вдоль поверхности с разной скоростью.

Инъекция, как было продемонстрировано, не оказывает влияния на профили как средних, так и турбулентных характеристик выше по течению относительно положения щелевого канала независимо от режима кавитационного обтекания и угла атаки. Из этого следует вывод, что взаимодействие кавитационной каверны и пристенной струи выше по течению относительно положения щели происходит только за счет изменения локального поля давления. В докавитационном случае интенсивность турбулентных флуктуаций скорости в пограничном слое за щелью неожиданно оказывается заметно выше для стандартной НЛ (без модификации), чем для модифицированной НЛ без инъекции, хотя модифицированное крыло имеет, очевидно, менее обтекаемую форму. Судя по всему, данное обстоятельство обусловлено различием формы задней части двух лопаток. При инжектировании жидкости с малой скоростью ($U_{inj}/U_0 < 1$) происходит значительный рост амплитуды турбулентных флуктуаций скорости и напряжений Рейнольдса. С повышением скорости инжектируемой жидкости до $U_{inj}/U_0 > 1$ пространственные распределения скоростных характеристик, наоборот, становятся более равномерными по сравнению со случаем без инъекции. Так, интенсивность турбулентности и амплитуда касательных напряжений падают почти в два раза по сравнению с безынеж-

ционным случаем. Уменьшение значений как флуктуационной составляющей скорости, так и касательных напряжений в абсолютном выражении свидетельствует о снижении лобового сопротивления гидрокрыла.

На стационарных режимах кавитационного обтекания в случае стандартной НЛ распределения скоростных характеристик слабо отличаются от докавитационного течения. Однако вблизи модифицированной НЛ происходят существенные изменения в распределениях средних и турбулентных характеристик даже для невозмущенного потока (без инжекции): увеличивается толщина пограничного слоя и растет амплитуда турбулентных флуктуаций и касательных напряжений. С началом инжекции жидкости ($U_{inj}/U_0 < 1$) кавитация становится менее развитой, а также может изменяться режим кавитационного обтекания НЛ. При этом происходит резкое сокращение зоны кавитации выше по течению и уменьшение количества и размера кавитационных пузырей, либо происходит вообще полное подавление парообразования. Это, скорее всего, обусловлено перераспределением давления на поверхности лопатки. При этом, как правило, происходит рост турбулентных флуктуаций скорости и касательных напряжений в абсолютном выражении ниже по течению относительно щели, во всяком случае, они никогда не становятся меньше, чем в случае стандартного гидрокрыла. Повышение скорости инжектируемой жидкости до $U_{inj}/U_0 > 1$, наоборот, несколько интенсифицирует парообразование по сравнению со случаем слабой инжекции, а не способствует дальнейшему подавлению кавитации, как можно было бы ожидать, хотя режим обтекания остается прежним. Вместе с тем было обнаружено, что амплитуда турбулентных характеристик в пределах пограничного слоя падает.

Кроме того, на некоторых нестационарных режимах, главным образом при малых углах атаки, низкоскоростная инжекция позволяет стабилизировать присоединенную каверну, подавляя автоко-

лебания ее длины, вызываемые развитием неустойчивостей. Увеличение скорости инжектирования, однако, не меняет режим течения, но несколько интенсифицирует парообразование. На режимах с более развитой кавитацией инжекция уже не способна оказать заметного влияния на динамику каверны, режим обтекания остается нестационарным. В таких случаях наблюдается обратный эффект: с увеличением скорости инжектирования происходит постепенный рост каверны. Однако при относительно больших углах атаки высокоскоростная инжекция позволяет сдвинуть точку отрыва пограничного слоя к задней кромке НЛ и тем самым улучшить гидродинамическое качество гидрокрыла. Следовательно, применение метода тангенциальной инжекции для управления нестационарными кавитационными кавернами оправданно только в узком диапазоне чисел кавитации и при малых углах атаки, когда можно подавить развитие нестационарностей.

Таким образом, низкоскоростная инжекция оказывается более эффективной для управления развитием кавитационных каверн, но инжектирование жидкости с высокой скоростью более выгодно с точки зрения гидродинамики течения, особенно на стационарных режимах. В общем и целом полученные результаты наглядно демонстрируют возможность метода непрерывной тангенциальной инжекции при определенных условиях управлять кавитирующими течениями. Реализация данного метода на промышленных объектах потенциально может расширить диапазон рабочих режимов гидротурбин за счет подавления кавитации и ухода от нежелательных нестационарных режимов. Однако очевидно, что для более глубокого понимания физики наблюдаемых явлений и оптимизации параметров работы данного метода требуются дальнейшие исследования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-29-00203, руководитель – проф. К. Хангялич) в НГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Watanabe S., Tsujimoto Y., Furukawa A. Theoretical analysis of transitional and partial cavity instabilities // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2001. – Т. 123. – № 3. – P. 692–697.
2. An assessment of the influence of environmental factors on cavitation instabilities / D.T. Kawakami, A. Fuji, Y. Tsujimoto, R.E.A. Arndt // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2008. – V. 130. – № 3. – P. (031303)–8.
3. The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet / M. Callenaere, J.-P. Franc, J.-M. Michel, M. Riondet // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2001. – V. 444. – P. 223–256.
4. Unsteady structure measurement of cloud cavitation on a foil section using conditional sampling technique / A. Kubota, H. Kato, H. Yamaguchi, M. Maeda // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 1989. – V. 111. – № 2. – P. 204–210.
5. Laberteaux K.R., Ceccio S.L. Partial cavity flows. P. 1. Cavities forming on models without spanwise variation // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2001. – V. 431. – P. 1–41.
6. Combined experimental and computational investigation of unsteady structure of sheet/cloud cavitation / B. Huang, Y.L. Young, G. Wang, W. Shyy // *ASME Journal of Fluids Engineering*. – 2013. – V. 135. – № 7. – P. (071301)–16.
7. Chatterjee D., Arakeri V.H. Towards the concept of hydrodynamic cavitation control // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1997. – V. 332. – P. 377–394.
8. 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.
9. 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.
10. Franc J.P., Michel J.M. Unsteady attached cavitation on an oscillating hydrofoil // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1988. – V. 193. – P. 171–189.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Hydrofoil performance control introducing tangential liquid jet / P.G. Kozhukharov, V.H. Hadjimikhalev, V.I. Mikuta, L.I. Maltzev // *ASME Fluids Engineering Division*. – 1985. – V. 31. – P. 67–74.
18. Кавитация на пластине с закругленной носовой частью и гидрокрыле NACA0015: 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.
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. Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) / Е.К. Ахметбеков, А.В. Бильский, Ю.А. Ложкин, Д.М. Маркович, М.П. Токарев, А.Н. Тюрюшкин // *Вычислительные методы и программирование*. – 2006. – Т. 7. – № 3. – С. 79–85.
21. Мальцев Л.И. Управление кавитационным течением путем замыкания каверны на жидкую струю и отсосом жидкости за каверной // *Труды Акустического института*. – 1969. – В. 7. – С. 39–51.

Поступила 24.11.2016 г.

Информация об авторах

Тимошевский М.В., инженер-исследователь Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; старший лаборант Физического факультета Новосибирского Национального исследовательского Государственного университета.

Запругаев И.И., инженер-исследователь Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; лаборант-исследователь Физического факультета Новосибирского Национального исследовательского Государственного университета.

Первунин К.С., младший научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; младший научный сотрудник Физического факультета Новосибирского Национального исследовательского Государственного университета.

Мальцев Л.И., доктор технических наук, главный 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, заместитель директора Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; профессор Физического факультета Новосибирского Национального исследовательского Государственного университета; профессор Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ханъялич К., доктор наук, профессор Физического факультета Новосибирского Национального исследовательского Государственного университета; профессор Факультета химического машиностроения Делфтского технического университета.

UDC 532.528+532.574.7+532.582.32

CAVITATION CONTROL ON A TWO-DIMENSIONAL HYDROFOIL BY MEANS OF CONTINUOUS TANGENTIAL INJECTION

Mikhail V. Timoshevskiy^{1,2},
timoshevskiy.mv@gmail.com

Ivan I. Zapryagaev^{1,2},
ivanzapryagaev@gmail.com

Konstantin S. Pervunin^{1,2},
pervunin@itp.nsc.ru

Leonid I. Maltsev¹,
maltzev@itp.nsc.ru

Dmitriy M. Markovich^{1,2,3},
dmark@itp.nsc.ru

Kemal Hanjalić^{2,4},
khanjalic@gmail.com

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1, Lavrentyev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Novosibirsk State University,
2, Pirogov Street, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

⁴ Delft University of Technology,
136, Julianalaan, Delft, 2628 BL, the Netherlands.

The onset of instabilities of various types, including those caused by cavitation, in ducts of hydraulic systems negatively affects the efficiency, reliability and safety of hydrotechnical and hydropower equipment. This fact makes it necessary to develop different means to control such flows.

The main aim of the study is to determine the possibility of applying and assessing the effectiveness of the method of gas-vapor cavity dynamics management based on continuous tangential injection of liquid.

The methods used in the study. In order to study the stages of evolution and spatial structure of partial cavities as well as to estimate their integral characteristics, the high-speed visualization was applied. Spatial distributions of the mean velocity and turbulent characteristics in one- and two-phase flows around the model hydrofoil were measured by Particle Image Velocimetry (PIV).

The results. The investigation was carried out for a modified model of guide vanes of a high-pressure turbine equipped with a spanwise slot channel in its surface to produce a wall jet to feed slowed down layers of liquid with a supplementary momentum over the suction side. In the experiments, the angle of attack of the model profile was changed from zero to nine degrees and various flow conditions were achieved by varying the cavitation number in a wide range. Basing on visual analysis of occurring flow regimes, starting from cavitation inception and finishing with developed unsteady cavities, the influence of injection on cavitation was determined. The effect of liquid injection with different velocities on the flow hydrodynamics was evaluated by measuring ensembles of instantaneous velocity which were used to calculate distributions of mean and turbulent characteristics. It was shown that the low-speed injection of liquid along the hydrofoil surface leads to intensification of turbulent fluctuations in the boundary layer and, thereby, hinders the development of an attached cavity due to production of additional perturbations in the flow. Injection with a high velocity, in its turn, causes a rise of the local flow velocity and reduction of turbulent fluctuations near the wall, which allows increasing the lift coefficient of the foil and its hydrodynamic quality owing to a pressure drop over the suction side at relatively low energy consumptions to generate the wall jet. However, in such a case the gas-vapor cavity becomes longer. Thus, the low-speed injection turns out to be effective to mitigate cavitation but the injection at a high velocity is more preferable from the standpoint of the flow hydrodynamics. Consequently, the implemented method of flow control is quite an efficient tool to manipulate hydrodynamic characteristics of the foil and decrease the intensity of vaporization and, under certain conditions, even to suppress instabilities linked with cavitation.

Key words:

Cavitation, partial cavities, instability, flow control, continuous tangential injection, guide vane, high-speed imaging, PIV.

The research was financially supported by the Russian Science Foundation (grant no. 14–29–00203, the chief is professor Kemal Hanjalić) at SNU.

REFERENCES

1. Watanabe S., Tsujimoto Y., Furukawa A. Theoretical analysis of transitional and partial cavity instabilities. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2001, vol. 123, no. 3, pp. 692–697.
2. Kawakami D.T., Fuji A., Tsujimoto Y., Arndt R.E.A. An assessment of the influence of environmental factors on cavitation instabilities. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2008, vol. 130, no. 3, pp. (031303)–8.
3. Callenaere M., Franc J.-P., Michel J.-M., Riondet M. The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, vol. 444, pp. 223–256.
4. Kubota A., Kato H., Yamaguchi H., Maeda M. Unsteady structure measurement of cloud cavitation on a foil section using conditional sampling technique. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1989, vol. 111, no. 2, pp. 204–210.
5. Laberteaux K.R., Ceccio S.L. Partial cavity flows. P. 1. Cavities forming on models without spanwise variation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, vol. 431, pp. 1–41.
6. Huang B., Young Y.L., Wang G., Shyy W. Combined experimental and computational investigation of unsteady structure of sheet/cloud cavitation. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2013, vol. 135, no. 7, pp. (071301)–16.
7. Chatterjee D., Arakeri V.H. Towards the concept of hydrodynamic cavitation control. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, vol. 332, pp. 377–394.
8. 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.
9. 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.
10. Franc J.P., Michel J.M. Unsteady attached cavitation on an oscillating hydrofoil. *Journal of Fluid Mechanics*, 1988, vol. 193, pp. 171–189.
11. Tassin Leger A., Ceccio S.L. Examination of the flow near the leading edge of attached cavitation. Part 1. Detachment of two-dimensional and axisymmetric cavities. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, vol. 376, pp. 61–90.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Akcabay D.T., Chae E.J., Young Y.L., Ducoin A., Astolfi J.A. Cavity induced vibration of flexible hydrofoils. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, vol. 49, pp. 463–484.
17. 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.
18. Kravtsova A.Yu., Markovich D.M., Pervunin K.S., Timoshevskii 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.
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. Akhmetbekov E.K., Bilsky A.V., Lozhkin Yu.A., Markovich D.M., Tokarev M.P., Tyuryushkin A.N. Software for experiment management and processing of data obtained by digital flow visualization techniques (ActualFlow). *Numerical Methods and Programming*, 2006, vol. 7, no. 3, pp. 79–85. In Rus.
21. Maltsev L.I. Upravlenie kavitatsionnym techeniem putem zamykaniya kaverny na zhidkuyu struyu i otsosom zhidkosti za kavernoy [Cavity flow control by closing the cavity on a liquid jet and by liquid suction behind the cavity]. *Proceedings of Acoustical Institute*, 1969, vol. 7, pp. 39–51.

Received: 24 November 2016.

Information about the authors

Mikhail V. Timoshevskiy, research engineer, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; senior laboratory assistant, Novosibirsk State University.

Ivan I. Zapryagaev, research engineer, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; research laboratory assistant, Novosibirsk State University.

Konstantin S. Pervunin, junior research fellow, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; junior research fellow, Novosibirsk State University.

Leonid I. Maltsev, Dr. Sc., principal scientific officer, 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, deputy director, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; professor, Novosibirsk State University; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Kemal Hanjalić, Dr. Sc., professor, Novosibirsk State University; professor, Delft University of Technology.