

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАВИТАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ ПЛАСТИНЫ С ЗАКРУГЛЕННОЙ НОСОВОЙ ЧАСТЬЮ И ГИДРОПРОФИЛЯ НАСА0015

Кравцова А.Ю.^{1,2}, Первунин К.С.^{1,2}, Тимошевский М.В.^{1,2}, Чуркин С.А.^{1,2}.

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,

630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Как известно, работа современного гидротехнического и гидроэнергетического оборудования зачастую сопровождается таким явлением, как кавитация. Кавитация, в свою очередь, является одной из основных причин снижения КПД и сокращения срока эксплуатации движителей и энергетических установок. Кроме того, взаимодействие кавитационной каверны со стенками подводных труб может значительно изменять характеристики потока, порождая пульсации расхода и давления, которые, в случае совпадения частот с резонансными, способны привести к крупной аварии. Современные математические модели не достаточно точно описывают развитые неустойчивые кавитационные течения. В связи с этим получение комплексных экспериментальных данных в упрощенных конфигурациях течений крайне важно как для понимания физических механизмов протекающих процессов, так и для развития математических моделей.

Эксперименты проводились на кавитационном гидродинамическом стенде Института Теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе. С помощью высокоскоростной визуализации и анемометрии по изображениям частиц (метод Particle Image Velocimetry – PIV) были исследованы кавитирующие течения вблизи плоской пластины с закругленной носовой частью и гидрокрыла НАСА0015 при углах атаки α от 0 до 9°. В ходе экспериментов варьировалось число кавитации в диапазоне от 0,6 до 4 путем изменения динамического давления. Было обнаружено, что при малых углах атаки кавитация на пластине возникает в форме массива стриков (см. рис.1-а.1,а.2), тогда как на гидрокрыле – в виде отдельных пузырей (см. рис.1-б.1). При переходе к развитым режимам обтекания на гидропрофиле образца НАСА0015, значительно увеличивается максимальный размер кавитационных пузырей. Одиночные пузыри начинают коалесцировать, формируя кавитационную каверну. Можно наблюдать, что парогазовая смесь, отрывающаяся от каверны образует регулярную ячеистую структуру (см. рис.1-б.2). При увеличении угла атаки до 9° структура кавитационной каверны на гидрокрыле изменяется на стриковую, как в случае с пластиной. Структура каверны на пластине не претерпевает существенных изменений при увеличении угла атаки. Кроме того было обнаружено, что продольный размер кавитационных облаков для пластины практически не зависит от числа кавитации, в отличие от кавитационных облаков, возникающих при обтекании модельного гидропрофиля образца НАСА0015.

Используя мгновенные изображения кавитационных каверн, были получены зависимости максимальной длины каверны от числа кавитации

$$\sigma = \frac{P_{\infty} - P_s}{2 \cdot (\rho \cdot U_0^2)}, \text{ где } P_{\infty} - \text{давление на входе в рабочий}$$

участок, $P_s = 0,045$ атм. – давление насыщенных паров для заданных условий, U_0 – среднерасходная скорость течения в рабочем канале, ρ – плотность воды. Экспериментальные данные могут быть аппроксимированы в виде $L_c/C = A \cdot \sigma^{-3} + B$ для пластины и $L_c/C = A \cdot \sigma^{-1} + B$ для гидрокрыла, где A и B – константы, зависящие от угла атаки тела обтекания (см. рис.2). Представленные выше результаты расходятся со степенной зависимостью $L_c/C \propto \sigma^{-2}$ полученной аналитически для плоской пластины в случае суперкавитации [1]. Сделанные в данной работе выводы могут быть полезны для верификации математических моделей.

В работе показано, что метод PIV позволяет измерять скорость в кавитирующих течениях, в том числе в пределах паровой фазы (см. рис.3). На развитых кавитационных режимах для обоих тел обтекания наблюдается значительное уменьшение относительных максимальных значений скорости над передней частью поверхности вследствие интенсивного перемешивания как внутри облаков, так и самими облаками, а также более раннего отрыва потока, связанного с появлением кавитации. Гидродинамический отрыв потока, обусловленный действием неблагоприятного градиента давления, и отрыв облачной каверны, возникающий вследствие ударного воздействия возвратного течения под каверной на межфазную границу, связаны между собой: отрыв усиливает кавитацию и приводит к более раннему формированию облаков, что оказывает ответное действие на основной поток. Постепенный рост парогазовой каверны способствует более раннему отрыву потока посредством смещения точки отрыва вверх по потоку и генерации более интенсивной рециркуляции. На развитых кавитационных режимах за областью замыкания каверны наблюдается формирование широкого турбулентного следа, а также происходит интенсификация турбулентных флуктуаций скорости вследствие сильного сдвига по краям облаков и формирования крупномасштабных вихревых структур вокруг паровой каверны. Таким образом, переход к развитым кавитационным режимам обтекания приводит к глобальному изменению турбулентной структуры течения по сравнению со случаем однофазного потока.

Список литературы:

1. Brennen Ch.E. Cavitation and Bubble Dynamics// Oxford University Press, 1995, 410p

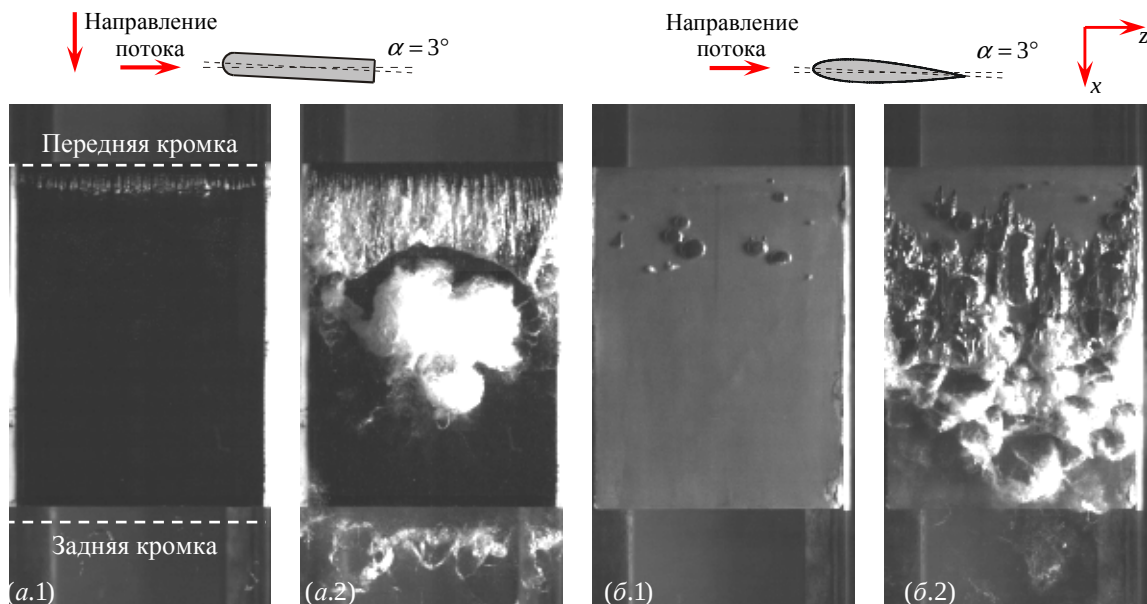


Рис.1. Мгновенные изображения кавитационных вихрей (вид сверху) при обтекании плоской пластины(а) при (а.1) $\sigma = 2,25$, $L_c/C = 0,07$ (стриковая кавитация), (а.2) $\sigma = 1,39$, $L_c/C = 0,50$, $St = 0,43$ (облачная кавитация) и модельного гидрокрыла серии NACA0015(б) при (б.1) $\sigma = 1,14$ (пузырьковая кавитация); (б.2) $\sigma = 0,93$, $L_c/C = 0,66$ (переходный режим), $\alpha = 3^\circ$.

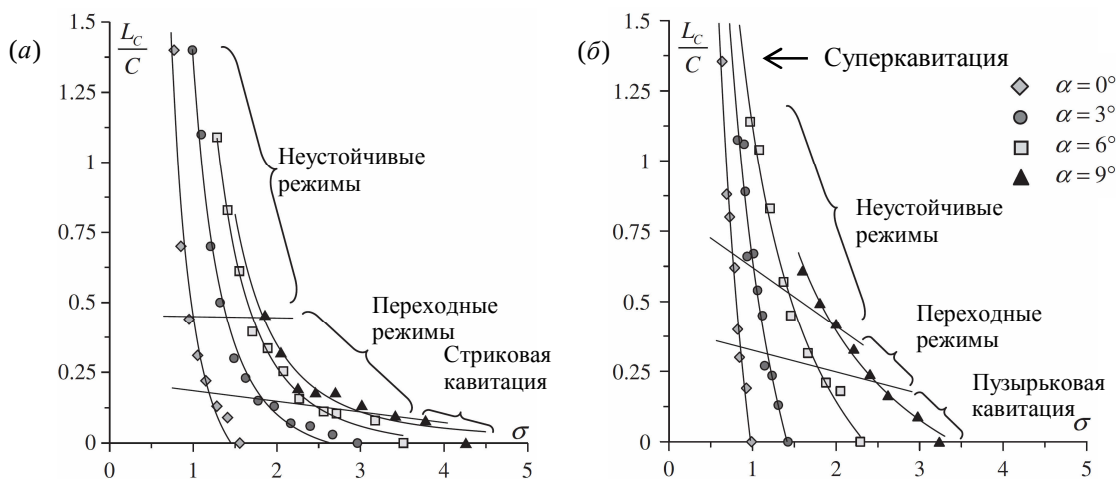


Рис.2. Зависимость длины кавитационной каверны нормированной на длину хорды тела обтекания L_c/C от числа кавитации σ для плоской пластины (а) и модельного гидрокрыла серии NACA0015(б)

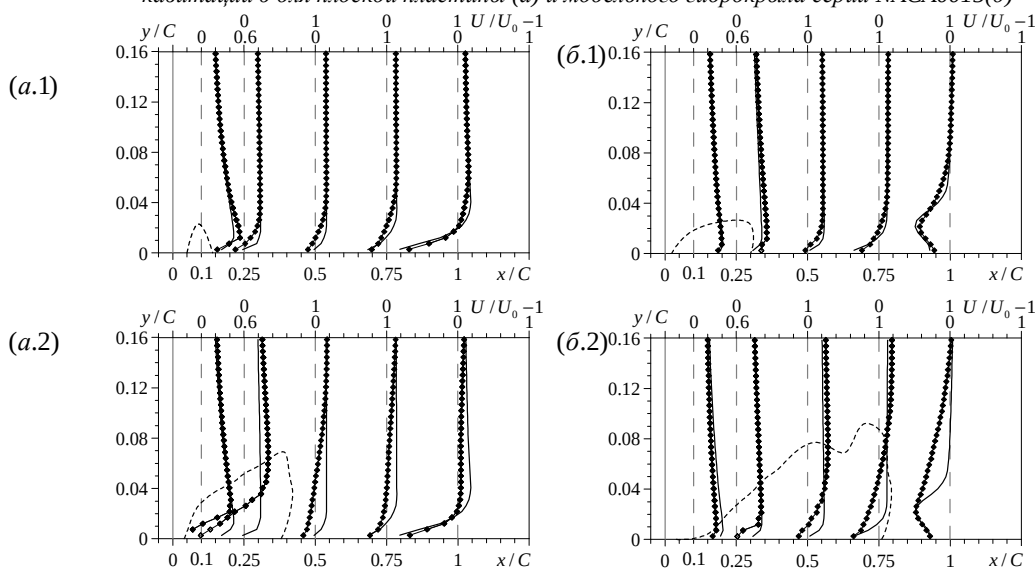


Рис.3. Эволюция продольной компоненты средней скорости вниз по течению в сравнении со среднерасходной скоростью U_0 при обтекании (а) пластины, когда (а.1) $\sigma = 2,25$, $L_c/C = 0,07$ (стриковая кавитация); (а.2) $\sigma = 1,39$, $L_c/C = 0,50$, $St = 0,43$ (облачная кавитация); (б) гидрокрыла NACA0015, когда (б.1) $\sigma = 1,14$ (пузырьковая кавитация); (б.2) $\sigma = 0,93$, $L_c/C = 0,66$ (переходный режим), $\alpha = 3^\circ$.