

Исследование механизмов развития кавитационных полостей в щелевом канале с использованием спектральной диагностики пульсаций давления*

А.Ю. Кравцова, С.Г. Скрипкин, Б.Р. Шарифуллин, Д.В. Литвинова, Д.Ф. Сиковский, Д.М. Маркович

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

E-mails: kravtsova.alya@gmail.com

Использование системы многоточечной диагностики высокочастотных пульсаций давления и последующее сопоставление полученных данных с результатами высокоскоростной визуализации в режиме облачного кавитационного обтекания гладкого крылового профиля в щелевом канале показало, что ударно-волновой механизм оказывает значительное влияние на развитие прикрепленной полости. Возвратное течение является основным механизмом отрыва и схода каверн.

Ключевые слова: кавитация, щелевой зазор, возвратное течение, ударно-волновой механизм, облачная кавитация, пульсации давления, спектральная плотность мощности пульсаций давления.

Введение

Кавитация возникает как в гидротехническом оборудовании, так и в индукторах криогенных ракетных двигателей при увеличении их размеров [1–3]. Ее наличие приводит к таким нежелательным явлениям, как повышенный шум, эрозия материала, увеличение вибрационных и колебательных нагрузок на отдельные части и механизмы оборудования [4–6]. Колебания давления, возникающие при нестационарных кавитационных процессах в среде, являются основным источником неустойчивостей и играют решающую роль в точном прогнозировании кавитационных повреждений для практических приложений. Однако причины периодического изменения давления в кавитирующих течениях еще не до конца изучены.

Основную сложность для анализа представляют режимы с облачной кавитацией, что обусловлено образованием межфазных неустойчивостей, взаимодействием кавитации и турбулентных процессов, возникновением возвратного течения и ударных волн

* Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

от схлопывания кавитационных пузырей. Известны две типичные неустойчивости кавитационных полостей, связанные с возникновением возвратного течения [7] и с появлением ударных волн [8–9]. Возвратное течение образуется при максимальном размере присоединенной кавитационной полости в области ее замыкания и направлено вблизи поверхности тела обтекания в противоположную основному потоку сторону. Безразмерная частота этого процесса варьируется в диапазоне от 0,25 до 0,45 [8, 10].

Известно, что акустика, то есть распространение волн плотности в среде, существенно изменяется при появлении в объеме жидкости газожидкостных смесей. Звуковая скорость резко падает, увеличивая эффект сжимаемости в кавитационных полостях [4, 11]. Авторами [12] впервые наблюдалось влияние динамики ударных волн на процесс разрушения и отрыва кавитационных полостей. Позднее было обнаружено, что генерация и распространение ударной волны значительно изменяют цикл эволюции кавитационной полости и вызывают сильные пульсации давления в потоке [6, 13]. В работе [9] с помощью методов рентгеновской денситометрии с высоким временным разрешением был визуализирован процесс распространения ударной волны внутри кавитационной полости и показано, что он вызывает локальное разрушение каверн, уменьшая долю пустот в полости. В то же время распространение ударной волны к передней кромке каверны приводит к разрушению полости, а затем к образованию облаков и их сходу вниз по потоку. Этот механизм отличается от классического механизма возвратно-поступательной струи и известен как механизм ударной волны. Авторы [8] показали, что безразмерная частота этого процесса (число Струхалея) варьируется в диапазоне от 0,05 до 0,1.

Существуют и другие механизмы, которые влияют на динамику развития кавитационных полостей и изменения поля давления в потоке. К ним можно отнести неустойчивости Кельвина–Гельмгольца (механизм Кельвина–Гельмгольца) [14–16] и неустойчивости Рэлея–Тейлора. Обычно эти механизмы, развивающиеся на более мелком масштабе, характеризуются наличием возвратной струи и ударной волны в потоке. Синхронизация методик измерения, включающая в себя измерение пульсаций давления и высокоскоростную визуализацию, позволяет детально изучить основные механизмы, влияющие на развитие кавитационных полостей, используя спектральный анализ данных давления в сочетании с визуальными наблюдениями динамики развития кавитационных полостей.

В настоящей работе проводится исследование кавитационного течения в щелевом зазоре с препятствием в виде крыла с использованием системы многоточечной регистрации высокочастотных пульсаций давления и последующим сопоставлением с данными высокоскоростной визуализации. Работа направлена на выявление основных механизмов неустойчивостей, влияющих на развитие кавитационных полостей.

Экспериментальная установка и параметры эксперимента

Изучение механизмов неустойчивости кавитационных полостей проводилось на экспериментальном кавитационном стенде Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Стенд представляет собой замкнутый контур [17]. Рабочий участок имеет прямоугольную форму с длиной испытательной секции $l = 176$ мм, шириной $W = 120$ мм и глубиной $h = 1,2$ мм. Стенки рабочего участка изготовлены из прозрачного материала — полиметилметакрилата, что позволяет проводить оптические измерения кавитационного течения. В рабочем участке размещалось крыло серии NACA0012 с гладкой поверхностью, изготовленное в соответствии с полиномом четвертой степени: $y = 60 [0,2969\sqrt{x} - 0,1260x - 0,3516x^3 + 0,2843x^3 - 0,1015x^4]$, где y — половина толщины крыла, x — положение точки

вдоль длинной хорды крыла, проведенной от передней кромки крыла (нулевое значение x) до задней кромки крыла (значение $x = C$). Длина хорды крыла составляла 70 мм, угол атаки крыла $\alpha = 8^\circ$.

Исследования проводились при различных расходах жидкости, в качестве которой использовалась очищенная дегазированная вода. Температура жидкости поддерживалась постоянной и составляла 26°C . Число Рейнольдса определялось как отношение средне-расходной скорости потока U_0 , умноженной на величину длинной хорды крыла C , к кинематической вязкости потока жидкости ν , в которой учитывалась температура воды: $Re = U_0 C / \nu$. Его значения варьировались от $0,5 \cdot 10^6$ до $1,5 \cdot 10^6$. Число кавитации рассчитывалось следующим образом: $\sigma = 2 \cdot (P_{in} - P_v) / (\rho U_0^2)$, где P_{in} — давление на входе в рабочий участок, P_v — давление насыщенных паров воды, ρ — плотность жидкости. Число кавитации варьировалось в диапазоне от 1,5 до 1,9.

Экспериментальное исследование кавитационного течения в щелевом канале вблизи крыла NACA0012 проводилось с использованием системы многоточечной диагностики высокочастотных пульсаций давления с последующим сопоставлением данных с результатами высокоскоростной визуализации, полученными ранее в работах [6, 17]. Система многоточечной диагностики высокочастотных пульсаций давления включала в себя 12 датчиков давления Keller M5 с динамическим диапазоном от 0 до 50 кГц и аналого-цифровым преобразователем с частотой дискретизации 2 МГц. Датчики давления были установлены в одной плоскости с внутренней стенкой рабочего участка в области развития парогазовой полости и схода кавитационных облаков. Фотография рабочего участка представлена на рис. 1а. Каждый из датчиков расположен на расстоянии x/C от передней кромки крыла. Датчик в районе лобовой кромки крыла находится на расстоянии $x/C = 0$,

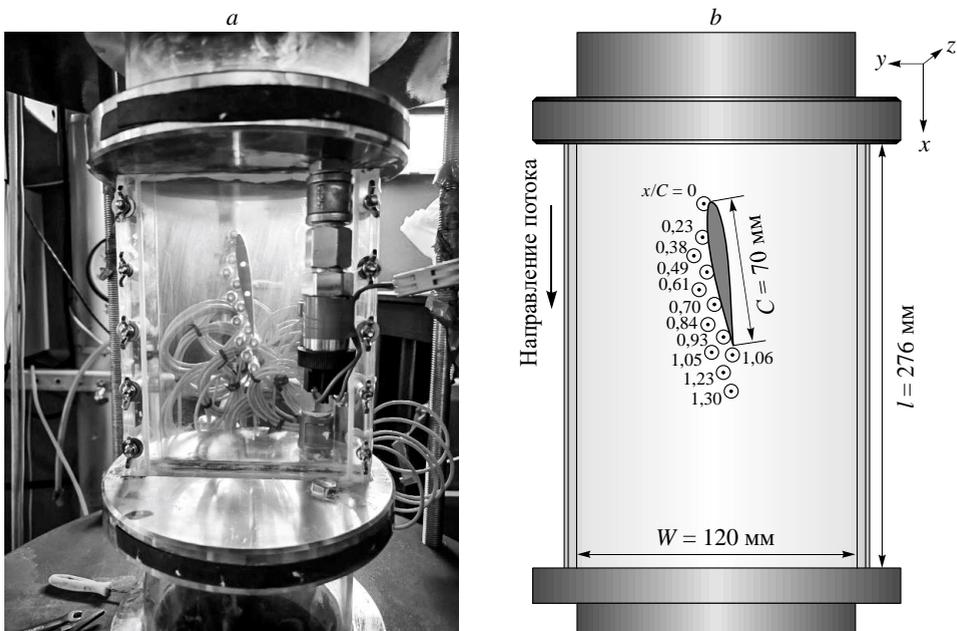


Рис. 1. Фотография рабочего участка с системой многоточечной регистрации высокочастотных пульсаций давления, вид спереди (а) и схема расположения датчиков давления в рабочем участке (б).

максимально удаленный датчик от задней кромки крыла расположен на расстоянии $x/C = 1,3$. Схема расположения датчиков давления в рабочем участке представлена на рис. 1*b*.

Результаты

Результаты представлены в виде спектрального анализа данных, полученных на каждом из двенадцати датчиков давления, расположенных вблизи крыла НАСА0012, и описания основных механизмов неустойчивостей, влияющих на развитие кавитационного течения в щелевом зазоре.

На рис. 2 приведены частотные спектры сигнала давления в трех характерных точках потока: на рис. 2*a* — в точке расположения датчика $x/C = 0,38$, на рис. 2*b* — в точке $x/C = 0,61$ и на рис. 2*c* — в точке $x/C = 1,06$. Число Рейнольдса для приведенного режима кавитационного обтекания крыла составляло $1,48 \cdot 10^6$. Как было показано ранее в работах [6, 17], при данном значении числа Рейнольдса наблюдается облачный тип кавитационного обтекания. Длина прикрепленной каверны варьировалась в зависимости от времени. Ее максимальное значение составляло $L = 0,65C$, минимальное — $L = 0,37C$, это указывает на то, что в передней области крыла кавитационная полость существует всегда. Также на основе данных высокоскоростной визуализации [6, 17] было отмечено близкое расположение кавитационной полости к поверхности крыла. Возвратное течение развивалось в небольшом промежутке: $0,38 < x/C < 0,84$. Этому соответствуют и данные по давлению. Пик максимальной амплитуды, отраженный на оси абсцисс в условных единицах измерения, умноженных на 10^{-3} ($\times 10^{-3}$), наблюдался на датчике, расположенном на расстоянии $x/C = 0,61$, значение частоты здесь составляет 132,6 Гц (рис. 2*b*). Безразмерное значение частоты — число Струхала (St) — равно 0,45 (рис. 3, область 1), и, как было показано и в предыдущих работах [8, 10], процесс отрыва связан с локальным развитием возвратного течения за счет образования крупномасштабных вихревых структур за областью замыкания каверны.

Частота $f \approx 132$ Гц была фиксирована всеми датчиками давления, расположенными на расстоянии $0,23 < x/C < 1,3$, поэтому можно сделать вывод, что возвратное течение является основным механизмом, влияющим на развитие кавитационного течения. При этом в точках $x/C = 0,38$ (рис. 2*a*), $x/C = 0,23$ и $x/C = 0,49$, по данным спектральной плотности мощности пульсаций давления, имело место двухпиковое поведение с частотами $f = 64,47$ Гц и $f = 132,11$ Гц. Бóльшая амплитуда наблюдалась у частоты $f = 64,47$ Гц. Безразмерное

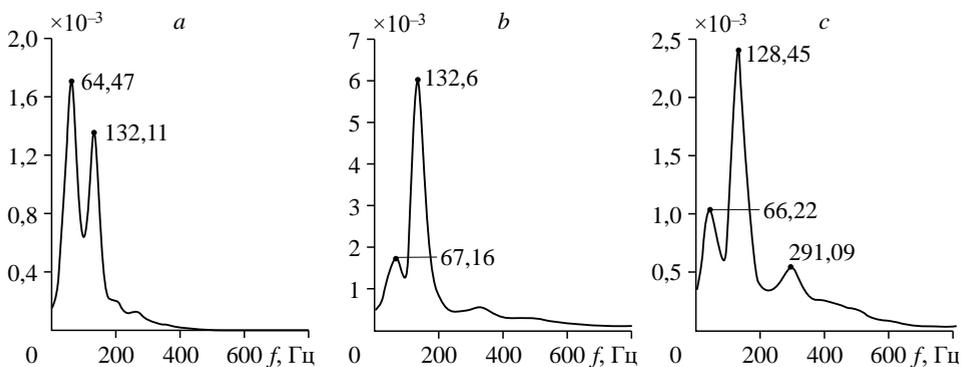
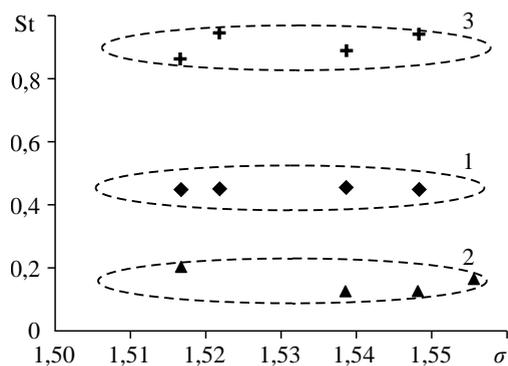


Рис. 2. Спектральная плотность мощности пульсаций давления, полученных в точках $x/C = 0,38$ (а), $0,61$ (б), $1,06$ (с).

Рис. 3. Значения чисел Струхала для различных чисел кавитации, полученные на основе данных спектральной плотности мощности пульсаций давления.

Область 1 соответствует частоте $f \approx 132$ Гц, фиксирующейся датчиками давления, расположенными в диапазоне $0,23 < x/C < 1,3$; область 2 соответствует частоте $f \approx 64\div 67$ Гц, фиксирующейся датчиками давления, расположенными в диапазоне $0,23 < x/C < 1,3$, при этом в диапазоне $0,23 < x/C < 0,49$ амплитуда этой частоты является максимальной, а в диапазоне $0,61 < x/C < 1,3$ — нет; область 3 соответствует частоте $f \approx 290$ Гц, фиксирующейся датчиками давления, расположенными в диапазоне $0,61 < x/C < 1,3$.



значение этой частоты располагается в диапазоне от 0,05 до 1 (рис. 3, область 2), что, как было показано в работе [8], соответствует развитию и влиянию ударно-волнового механизма. Тогда можно утверждать, что в области расположения прикрепленной каверны основным механизмом, влияющим на ее развитие, является ударно-волновой.

Третья частота ($St \approx 0,9$) наблюдается только в области задней кромки крыла и его следе ($0,61 < x/C < 1,3$), являясь практически удвоенной первой частотой (рис. 3, область 3). Природа этой частоты связана с попеременным сходом вихревых структур то с нижней, то с верхней части крылового профиля.

Таким образом, показаны два механизма, влияющие на развитие кавитационной полости в щелевом зазоре при облачном типе развития кавитации, а именно: механизм возвратной струи и механизм ударной волны. Ударно-волновой механизм оказывает значительное влияние на развитие прикрепленной полости. Возвратное течение является доминирующим механизмом отрыва и схода кавитационной полости.

Полученные результаты дают глубокое представление о пространственно-временном поведении облачной кавитации и способствуют пониманию физики явления.

Заключение

В работе изучались механизмы отрыва кавитационных облаков в щелевом зазоре в окрестности крылового профиля серии NASA0012. Экспериментальное исследование проводилось с использованием системы многоточечной диагностики высокочастотных пульсаций давления с последующим сопоставлением данных с результатами высокоскоростной визуализации кавитационных полостей в потоке, полученными ранее [6, 17].

Авторами подробно исследовался облачный тип кавитационного обтекания. Максимальные значения пульсаций давления наблюдаются в области замыкания прикрепленной кавитационной полости, что связано с сильной нестационарностью потока, вызванной отрывом кавитационных облаков.

Анализ спектральных особенностей проводился на основе сигналов давления, полученных на стенке рабочего канала, и данных высокоскоростной визуализации. Установлено, что существуют три частотных пика. Основная частота связана с осцилляциями задней кромки прикрепленной кавитационной полости, которые зависят от развития возвратного течения, она составляет $St \approx 0,45$. Процесс отрыва связан с локальным развитием возвратного течения за счет образования крупномасштабных вихревых структур за областью замыкания каверны. Возникновение указанной частоты фиксируется датчиками, расположенными в диапазоне $0,23 < x/C < 1,3$. Вторая частота ($St \approx 0,1$) связана

с влиянием ударно-волнового механизма, возникающего при схлопывании кавитационных пузырей и каверн [8]. В области $0,23 < x/C < 0,49$ имеет место двухпиковое поведение с доминирующей ударно-волновой амплитудой, что указывает на сложность развития кавитационных структур в потоке и вызванных ими пульсаций давления. Третья частота ($St \approx 0,9$) наблюдается в области задней кромки крыла и его следе ($0,61 < x/C < 1,3$), являясь практически удвоенной основной частотой ($St \approx 0,45$). Природа этой частоты связана с попеременным сходом вихревых структур то с нижней, то с верхней части крылового профиля.

Возникающие в потоке неустойчивости Кельвина–Гельмгольца и Рэлея–Тейлора, их влияние на развития кавитационной полости и их взаимодействие с каверной планируется исследовать в дальнейшем.

Список литературы

1. Цой М.А., Скрипкин С.Г., Наумов И.В., Кравцова А.Ю. Высокоскоростная визуализация кавитационных полостей, возникающих в щелевом канале сложной формы // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 6. С. 1013–1018.
2. Скрипкин С.Г., Цой М.А., Шторк С.И. Экспериментальное исследование формирования двойного прецессирующего вихревого жгута в модельных отсасывающих трубах // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 73–82.
3. Wang G., Senocak I., Shyy W., Ikehagi T., Cao S. Dynamics of attached turbulent cavitating flows // Progress in Aerospace Sci. 2001. Vol. 37. P. 551–581.
4. Brennen Ch.E. Cavitation and bubble dynamics. New York: Oxford University Press, 1995. 254 p.
5. Franc J.P., Michel J.M. Fundamentals of cavitation. Kluwer Academic Publishers, 2005. 306 p.
6. Skripkin S.G., Tsoy M.A., Kravtsova A.Y. Experimental study of cavitating flow around a NACA 0012 hydrofoil in a slit channel // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. P. 11182-1–11182-9.
7. Мальцев Л.И. Управление кавитационным течением путем замыкания каверны на жидкую струю и отсосом жидкости за каверной // Тр. Акустического института. 1969. Т. 7. С. 39–51.
8. Callenaere M., Franc J.P., Michel J.M., Riondet M. The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet // J. Fluid Mechanics. 2001. Vol. 444. P. 223–256.
9. Ganesh H., Mäkiharju S.A., Ceccio S.L. Bubbly shock propagation as a mechanism for sheet-to-cloud transition of partial cavities // J. Fluid Mechanics. 2016. Vol. 802. P. 37–78.
10. Kravtsova A.Yu., Markovich D.M., Pervunin K.S., Timoshevskiy M.V., Hanjalić K. High-speed visualization and PIV measurements of cavitating flows around a semi-circular leading-edge flat plate and NACA0015 hydrofoil // Intern. J. Multiph. Flow. 2014. Vol. 60. P. 119–134.
11. Shamsborhan H., Coutier D.O., Caignaert G., Abdel Nour F. Experimental determination of the speed of sound in cavitating flows // Experiments in Fluids. 2010. Vol. 49, No. 6. P. 1359–1373.
12. Arndt R.E.A., Song C.C.S., Kjeldsen M., He J., Keller A. Instability of partial cavitation: A numerical/experimental approach // Twenty-Third Symp. on Naval Hydrodynamics. Val de Reuil, France, 2001. P. 1–16.
13. Leroux J.B., Astolfi J.A., Billard J.Y. An experimental study of unsteady partial cavitation // J. Fluids Engng. 2004. Vol. 126. P. 94–101.
14. Brandner P.A., Walker G.J., Niekamp P.N., Anderson B. An experimental investigation of cloud cavitation about a sphere // J. Fluid Mechanics. 2010. Vol. 656. P. 147–176.
15. Podbevšek D., Petkovšek M., Ohl C.D., Dular M. Kelvin-Helmholtz instability governs the cavitation cloud shedding in venture microchannel // Intern. J. Multiphase Flow. 2021. Vol. 142. P. 103700-1–103700-7.
16. Pipp P., Hocevar M., Dular M. Numerical insight into the Kelvin-Helmholtz instability appearance in cavitating flow // Appl. Sci. 2021. Vol. 11. P. 2644-1–2644-12.
17. Skripkin S.G., Starinskiy S.V., Tsoy M.A., Vasiliev M.M., Kravtsova A.Y. Effect of a textured surface on the occurrence and development of cavitation on the hydrofoil // Physics of Fluids. 2023. Vol. 35. P. 025109-1–025109-13.

*Статья поступила в редакцию 23 июля 2024 г.,
принята к публикации 8 ноября 2024 г.*