

УДК: 531.3, 53.05, 532.5

## **Высокоскоростная визуализация кавитационных полостей, возникающих в щелевом канале сложной формы\***

**М.А. Цой, С.Г. Скрипкин, И.В. Наумов, А.Ю. Кравцова**

*Институт теплофизики им. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: Kravtsova.Alya@gmail.com

В статье представлены результаты экспериментального исследования кавитационного обтекания крыла серии NACA0012 в узком щелевом канале шириной 1,2 мм. Соотношение сторон тела обтекания составило 0,02. Для выявления основных особенностей двухфазного течения проведена высокоскоростная визуализация с помощью камеры Photron FASTCAM NOVA S12 с частотой дискретизации 20 кГц. Определена внутренняя структура кавитационных каверн. Определены основные частоты образования каверн в потоке с помощью цифровой обработки данных визуализации. Показано, что близкое расположение стенок канала значительно влияет на распространение возвратного течения под каверной и на ее отрыв.

**Ключевые слова:** кавитация, крыло серии NACA0012, высокоскоростная визуализация, число Струхала.

### **Введение**

Кавитация — одна из основных причин повреждения различных гидравлических машин, таких как насосы, судовые гребные винты, гидротурбины. Кавитация возникает в результате местного понижения давления в жидкости, когда оно падает ниже давления насыщенного пара. Одним из негативных последствий кавитации является эрозия материала конструкций, приводящая к разрушению гидроагрегата. Кроме того, схлопывание паровых полостей является причиной возникновения шума и вибрации, что приводит к снижению эффективности, надежности и ресурса гидроагрегатов. Поэтому одной из основных задач является исследование колебательного и резонансного поведения паровых полостей.

Изучение вихревых структур и кавитации при обтекании тел в агрегатах реальных гидроэлектростанций, в том числе микрогидроэлектростанций, когда близкорасположенные стенки проточного тракта в значительной степени влияют на гидродинамику потока, затруднено, поэтому многие исследователи наблюдают за поведением парогазовых структур и жидкости в лабораторных установках, используя уменьшенные модели тел обтекания, например, таких как цилиндр, пластина, крылья серии NACA и др. [1–4].

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10217).

В настоящее время фотографирование является основным прямым методом изучения кавитационных течений. Данный метод может быть реализован различными способами. Одним из таких способов является съемка отдельных изображений с достаточно малой выдержкой, обеспечивающей четкость изображения. Другой метод — фотографирование с длительной выдержкой — используется для определения средней формы областей кавитации [5, 6]. Третий метод — скоростная визуализация — заключается в получении набора изображений с небольшой выдержкой и малой межкадровой задержкой, он все чаще используется в последнее время для изучения динамики парогазовых полосей [7, 8]. Этот метод позволяет определить границы каверны, частоту её пульсаций, а также выявить структуру и особенности обтекания различных объектов, поэтому он и был выбран для исследования парогазовых областей в представленной работе.

Кавитационная полость, возникающая на поверхности различных тел обтекания, может находиться в двух различных состояниях: квазистационарном и нестационарном. Во второй половине 20 века исследователями было обнаружено, что частичные полости с максимальной длиной более четверти хорды, замыкающиеся на поверхности тела обтекания, сильно нестационарны [9–11]. Основной причиной нестационарности кавитации являются возвратные струи, образующиеся в замыкающей части присоединенной полости из-за большого градиента давления [2, 12, 13]. Возвратные струи начинают формироваться у стенок рабочего канала в местах стыка подводных крыльев со стенками над кромками корпуса [14, 15]. Так называемая вторичная вихревая структура в этой области может образовываться как одновременно у двух стенок, так и попеременно: сначала образование происходит у левой стенки, а затем у правой [2, 4]. Каждая из этих зон описывается разными частотными диапазонами. В работе [3] было показано, что при образовании достаточно большой каверны над крылом и одновременном развитии возвратной струи у двух стенок рабочего участка значения чисел Струхала обычно составляют от 0,3 до 0,4. В случае поочередного формирования вихревой структуры у стенок значения чисел Струхала находятся в пределах 0,5–0,6, что превышает число Струхала при классическом обтекании подводного крыла в полтора-два раза [8]. Поэтому, по данным авторов статьи [8], значения около 0,35 можно считать характерным безразмерным частотным параметром отрыва нестационарных полостей при обтекании крыла.

В работах [2] и [16] было продемонстрировано, что одним из основных параметров, влияющих на кавитационную неустойчивость при обтекании тел, является отношение размаха крыла к длине хорды  $AR$ :  $AR = s/C$  — аспектное отношение (англ. aspect ratio). Авторы исследования [2] сравнили основную частоту отрыва полостей при обтекании трех подводных крыльев НАСА, используя значения  $AR$  в диапазоне от 1,43 до 2,35. Было выдвинуто предположение, что число Струхала уменьшается из-за уменьшения размаха крыла, однако комплексного исследования этого вопроса проведено не было. В работе [15] было показано, что размах крыла, а также положение стенок канала влияют на «резонансный» эффект крыла, сопровождающийся импульсами высокого давления, повышенными вибрациями и шумом из-за возникновения нестационарной возвратной струи и течения в поперечном направлении. Был исследован диапазон значений  $AR$  от 0,4 до 1,25. Однако крыловые профили с меньшим размахом не исследовались.

Целью настоящей работы является восполнение пробелов экспериментальных данных о критически малом отношении  $AR$ , когда трехмерная сложная кавитирующая структура течения становится квазидвумерной. Авторами экспериментально исследуется кавитационное обтекание крыла с отношением  $AR = 0,02$  при различных скоростях

набегающего потока. Следует отметить, что удлинение крыла в представленном исследовании  $AR = 0,02$  значительно ниже, чем в предыдущих исследованиях.

Результаты работы могут быть востребованы в технических приложениях гидроэнергетики, в том числе для микрогидроэлектростанций.

### Экспериментальная установка и методика измерений

Исследование кавитации, возникающей при обтекании крылового профиля, проводилось на кавитационном гидродинамическом стенде Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Тело обтекания считалось модельным объектом. Крыло изготавливалось из оптически прозрачного полиметилметакрилата. Тело обтекания было выполнено по профилю крыла серии  $NACA0012$  со скругленной задней кромкой радиусом 0,4 мм. Длина хорды крыла  $C$  — 60 мм, размах крыла  $s$  — 1,2 мм. Таким образом, отношение  $AR = s/C$  исследуемого профиля составляет 0,02.

Щелевой канал, в который устанавливалось крыло на расстоянии 25 мм от входа, имел длину 145 мм и ширину 120 мм. Угол атаки крыла относительно набегающего потока равнялся  $21^\circ$ . Среднерасходное значение скорости при экспериментальных исследованиях варьировалось в диапазоне от 8 до 18 м/с. Кавитация на теле обтекания начинала проявляться при скорости входного потока 9,8 м/с. Дегазация рабочей жидкости проводилась в течение нескольких часов при медленном течении жидкости в рабочем контуре, газовые пузыри скапливались в специализированном отсеке установки и удалялись.

Число Рейнольдса рассчитывалось как  $Re = U_0 C / \nu$ , где  $\nu$  — кинематическая вязкость,  $C$  — длина хорды,  $U_0 = Q/S$  — средняя скорость потока,  $Q$  — расход,  $S$  — площадь поперечного сечения канала минус миделево сечение крыла. Число кавитации записывалось в виде  $\sigma = 2(P_0 - P_{\text{пар}}) / \rho U_0^2$ , где  $P_0$  — давление на входе в рабочий участок,  $P_{\text{пар}}$  — давление насыщенного пара,  $\rho$  — плотность воды. Число Струхали определялось как  $St = f C / U_0$ , где  $f$  — основная частота отрыва газовых полостей,  $C$  — длина хорды,  $U_0$  — средняя скорость потока. Фотография рабочего канала представлена на рис. 1.

Для детального изучения пространственной структуры и динамики парогазовых полостей проводилась визуализация высокоскоростной камерой Photron FASTCAM NOVA S12 с частотой дискретизации 20 кГц. Равномерный источник света располагался за рабочим участком, обеспечивая высококонтрастное изображение с четкими границами парогазовых полостей.

### Результаты и обсуждение

Исследована структура кавитирующего течения, возникающего за крылом серии  $NACA0012$  с отношением  $AR = 0,02$  и углом атаки  $21^\circ$ . Для всех исследованных режимов течения кавитационная каверна, формирующаяся вблизи крыла, оказалась существенно нестационарной. Типичный пример кавитационного

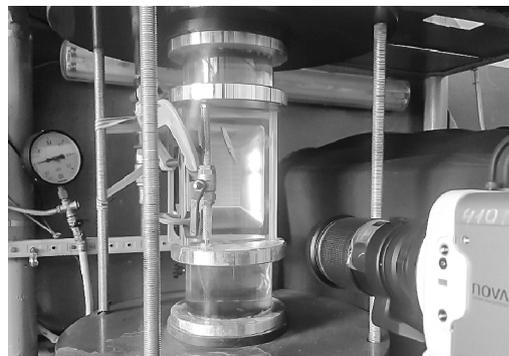


Рис. 1. Фотография рабочего канала.

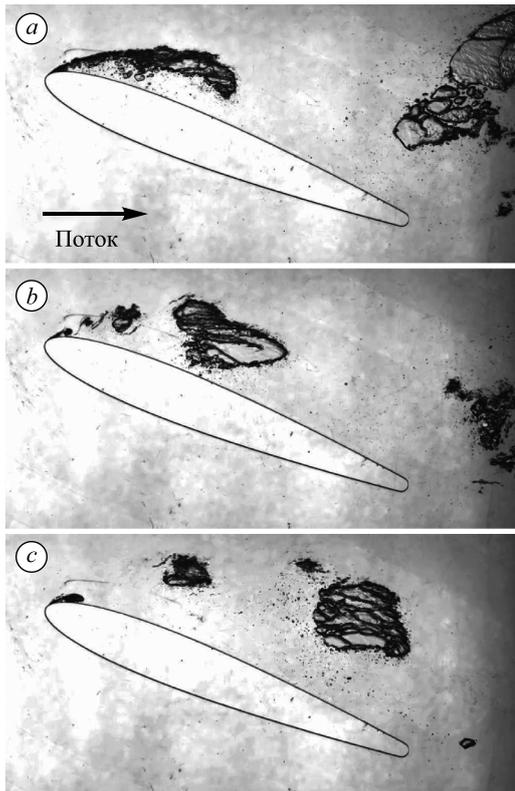


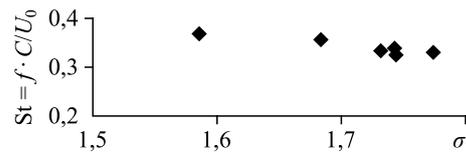
Рис. 2. Примеры последовательности высокоскоростной визуализации кавитации при обтекании крыла NACA0012 с  $AR = 0,02$ ,  $Re = 8,3 \cdot 10^5$ ,  $\sigma = 2,94$ .

обтекания крыла приведен на рис. 2. Максимальная длина присоединенной кавитационной полости показана на рис. 2а, она составляет примерно половину длины хорды крыла. Толщина полости составляет около  $0,25C$ , что связано с достаточно большим углом атаки профиля. Прикрепленная полость, расположенная на таком расстоянии от границы тела обтекания, считается достаточно широкой, как было показано в работе [17]. Возвратное течение, распространяющееся под каверной, разрывает парогазовую полость сразу в нескольких местах, что сопровождается образованием серии кавитационных облаков (см. рис. 2б). В первые моменты кавитационные облака связаны между собой вытянутыми тонкими вихревыми нитями. Через время  $t = 0,65$  мс вихревые нити исчезают и образуется последовательность отдельно расположенных кавитационных облаков (рис. 2с), которые впоследствии сносятся вниз по потоку. Такой тип отрыва широких кавитационных каверн для тел с отношением  $AR$  более  $0,4$  является нехарактерным. Механизм отрыва, описанный в работе [17], заключается в следующем: возвратное течение, распространяющееся под каверной, разрывает парогазовую полость вблизи передней кромки крыла со сходом единого кавитационного облака вниз по потоку. То есть разделение «широкой» каверны на облака небольшого размера является характерным для тел обтекания с малым отношением  $AR$ , и причиной такого разбиения является влияние сил трения на близкорасположенные стенки рабочего канала.

Таким образом, кавитационные облака, дошедшие до задней кромки крылового профиля с малым отношением  $AR = 0,02$ , представляют собой конгломерат плоских парогазовых пузырьков (рис. 2с). Этот конгломерат вращается и разрушается как единое целое.

Кавитационная полость, формирующаяся за скругленной задней кромкой крыла NACA0012, активно развивается в противофазе с парогазовой полостью, формирующейся на передней кромке крыла. Каверна за закругленной задней кромкой также состоит из плоских парогазовых пузырей. Эти пузырьки могут сливаться в одну полость, и в месте их слияния на межфазной границе, расположенной вблизи стенки рабочего канала, образуются кольцевые волны. Эти волны распространяются на расстояние  $0,04C$  и затем затухают. Отрыв кавитационного облака, образующегося за задней кромкой крыла, происходит за счет движения струи жидкости вниз по потоку вдоль поверхности тела обтекания. Затем отделившееся кавитационное облако уносится вниз по течению и разрушается.

Рис. 3. Число Струхалия  $St$  в зависимости от числа кавитации  $\sigma$ .



По мере движения жидкости вниз по потоку на верхней поверхности крыла в области передней кромки возникает новая присоединенная парогазовая полость. Далее процесс роста и отрыва каверны повторяется.

С помощью цифровой обработки изображений определены основные частоты образования каверн в потоке при обтекании крыла с малым отношением  $AR$ . На первом шаге определялись границы парогазовых полостей с помощью бинаризации на основе метода Оцу. Далее были получены и проанализированы основные геометрические параметры — характерные размеры, площадь и форма облаков. Объем полости для каждого кадра можно рассчитать, умножив площадь полости на толщину канала. По этим данным восстанавливается динамика объема полости. Применение алгоритма быстрого преобразования Фурье к последовательности значений объема полости позволяет определить основную частоту отрыва кавитационных облаков. Для нестационарного режима течения, реализующегося при  $Re = 8,3 \cdot 10^5$  и  $\sigma = 2,94$ , эта частота составила 72 Гц. По такому же алгоритму были определены основные частоты отрыва кавитационных облаков для всех рассмотренных случаев. Отрыв каверны происходил с частотой от 70 до 104 Гц, в зависимости от скорости набегающего потока.

Для сопоставления полученных результатов с данными других авторов, исследовавших кавитационное обтекание крыльев с большим отношением  $AR$ , был рассчитан безразмерный частотный параметр — число Струхалия по среднерасходной скорости потока. Зависимость числа Струхалия от числа кавитации представлена на рис. 3. Числа Струхалия для крыла серии NACA0012 с малым отношением  $AR = 0,02$  варьируются от 0,3 до 0,4. Такой диапазон чисел Струхалия характерен для нестационарных кавитационных полостей, возникающих вблизи тел обтекания (угол атаки к набегающему потоку более 6 градусов, соотношение сторон более 0,4), отрыв которых происходит за счет развития возвратной струи. Типичным примером является облачная кавитация, подробно описанная в работах [2, 3, 17 и др]. Таким образом, в представленном исследовании показано, что основная частота сбрасывания кавитационных каверн не зависит от отношения  $AR$  крылового профиля и составляет примерно 0,35.

Авторы предполагают, что полученные данные по визуализации придадут новый импульс изучению кавитационных течений и послужат поиску причины нестационарного поведения парогазовых полостей.

### Список литературы

1. Cervone A., Bramanti C., Rapposelli E., d'Agostino L. Thermal cavitation experiments on a NACA 0015 hydrofoil // J. Fluids Engng. 2006. Vol. 128. P. 326–331.
2. Kawakami D.T., Fuji A., Tsujimoto Y., Arndt R.E.A. An assessment of the influence of environmental factors on cavitation instabilities // J. Fluids Engng. 2008. Vol. 130. P. 031303-1–031303-8.
3. 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. of Multiphase Flow. 2014. Vol. 60. P. 119–134.
4. Кравцова А.Ю. Экспериментальное исследование кавитационного обтекания двумерных гидрокрыльев: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05. Новосибирск, 2018. 139 с.
5. Крэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. М.: Мир, 1974. 688 с.
6. Franc J.P., Michel J.M. Fundamentals of cavitation. Kluwer Academic Publishers, 2005. 306 p.
7. Skripkin S., Tsoy M., Kuibin P., Shtork S. Swirling flow in a hydraulic turbine discharge cone at different speeds and discharge conditions // Exp. Therm. Fluid Sci. 2019. Vol. 100. P. 349–359.

8. **Timoshevskiy M.V., Churkin S.A., Kravtsova A.Yu., Pervunin K.S., Markovich D.M., Hanjalić K.** Cavitating flow around a scaled-down model of guide vanes of a high-pressure turbine // Intern. J. of Multiphase Flow. 2016. Vol. 78. P. 75–87.
9. **Мальцев Л.И.** Управление кавитационным течением путем замыкания каверны на жидкую струю и отсосом жидкости за каверной // Тр. Акустического института. 1969. Вып. 7. С. 39–51.
10. **Мальцев Л.И., Мигиренко Г.С., Микута В.И.** Кавитационные течения с замыканием каверны на струю жидкости // Исследования по развитой кавитации. Новосибирск, 1976. С. 96–106.
11. **Мальцев Л.И.** Пристенные струи со свободными внешними границами // Сиб. физико-технич. журн. 1993. № 3. С. 38–55.
12. **Franc J.P.** Cavitation scale effects for valves // Proceedings of the Fourth Intern. Symp. on Cavitation, June, Pasadena, CA, 2001. 21 p.
13. **Watanabe S., Tsujimoto Y., Furukawa A.** Theoretical analysis of transitional and partial cavity instabilities // ASME J. Fluids Engng. 2001. Vol. 123. P. 692–697.
14. **Saito Y., Takami R., Nakamori I., Ikehagi T.** Numerical analysis of unsteady behavior of cloud cavitation around a NACA0015 foil // Comput. Mech. 2007. Vol. 40. P. 85–96.
15. **Sedlar M., Soukal J., Komarek M., Volkov A.V., Ryzhenkov A.V.** Numerical simulation of interaction between fluid and vapor structures in multiphase flow around hydrofoil // J. of Applied Math. and Physics. 2018. Vol. 6. P. 1614–1624.
16. **Gonçalves R.T., Franzini G.R., Rosetti G.F., Meneghini J.R., Fujarra A.L.C.** Flow around circular cylinders with very low aspect ratio // J. Fluids Struct. 2015. Vol. 54. P. 122–141.
17. **Callenaere M., Franc J.-P., Michel J.-M., Riondet M.** The cavitation instability induced by the development of a reentrant jet // J. Fluid Mech. 2001. Vol. 444. P. 223–256.

*Статья поступила в редакцию 10 марта 2022 г.,  
после доработки — 25 мая 2022 г.,  
принята к публикации 17 июня 2022 г.,  
после дополнительной доработки — 25 июля 2022 г.*