

М. В. Кашкарлова^{1✉}, С. В. Какаулин¹, К. С. Зубанов¹, А. Ю. Кравцова¹

Цифровая визуализация кавитационного обтекания крыла в щелевом канале

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: m.agafontseva@gmail.com

Аннотация. Кавитация часто возникает в процессе работы высоконапорного гидротехнического оборудования в областях низкого давления. Изучению этого явления посвящено множество работ, поскольку кавитация вносит вклад в поток, изменяя его характеристики, а так же приводит к разрушению частей гидросооружений. Кавитация может возникать не только в основном потоке, но и в щелевых зазорах оборудования в области расположения креплений и различных перемычек. Кавитационные пузыри, возникающие в зазорах, могут, выходя из области зазора, оказывать влияние и на основной поток [1, 2]. В настоящей работе рассмотрено кавитационное обтекание крылового профиля с нанесенной структурированной шероховатостью в щелевом канале. Компьютерное моделирование кавитации реализовано в программном пакете STAR CCM+.

Ключевые слова: кавитация, щелевой канал, крыло, число Рейнольдса, структурная шероховатость

M. V. Kashkarova^{1✉}, S. V. Kakaulin¹, K. S. Zubanov¹, A. Yu. Kravtsova¹

Digital visualization of the cavitation flow of a hydrofoil in a slit channel

¹Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: m.agafontseva@gmail.com

Abstract. Cavitation often occurs during the operation of the high-pressure hydraulic equipment in low-pressure areas. A lot of work has been devoted to the study of this phenomenon, since cavitation contributes to the flow – it changes its characteristics, and also leads to the destruction of parts of hydraulic structures. Cavitation can occur not only in the main stream, but also in the slits of the equipment in the area of the fasteners and various jumpers. Cavitation bubbles arising in the slits can also affect the main flow when leaving the slit area [1, 2]. In this paper, the cavitating hydrofoil with an applied structured roughness in a slit channel is considered. Computer simulation of cavitation is implemented in the STAR CCM+ software package.

Keywords: cavitation, slit channel, hydrofoil, Reynolds number, structured roughness

Введение

Поскольку кавитация, неизбежно возникающая в ходе работы гидрооборудования, приводит к негативным последствиям, исследованию методов подавления и управления кавитацией посвящено множество работ. Так, в [3] изучалось влияние выступающих кромок и поверхностных рифлений на кавитационные характеристики и возникновение шумов, генерируемых судами на подводных кры-

лях. Методы управления и подавления кавитации на крыловых профилях и исследование структуры кавитационных каверн были описаны в [4]. В основном, работы описывают явление кавитации при обтекании крыла в макромасштабных, широких каналах. Исследования в узких, так называемых щелевых каналах практически не проводились. В [5] исследовано обтекание цилиндрической преграды в щелевом канале. В работе показана динамика развития кавитационной каверны, и определены частоты процесса. В настоящей работе исследовано кавитационное обтекание преграды в виде крыла с нанесенной шероховатостью в щелевом канале. Исследовано поле скорости в области структурированной шероховатости.

Методы и материалы

Для моделирования кавитационного течения в щелевом канале использовался пакет STAR CCM+. Расчетная область представляла собой прямоугольный параллелепипед, повторяющий размеры экспериментальной установки ИТ СО РАН: длина канала – 145 мм, ширина – 120 мм, глубина – 1,2 мм (рис. 1).

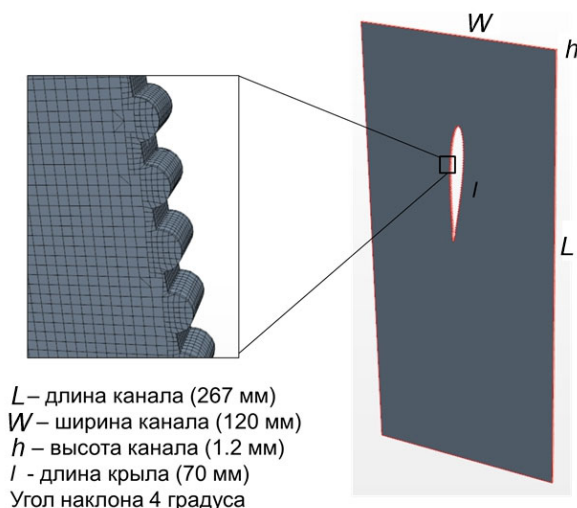


Рис. 1. Расчетная область

Преграда представляла собой крыловой профиль НАСА 012 длиной 70 мм с нанесенной структурированной шероховатостью, представляющей из себя цилиндрические выемки диаметром 0,5 мм, центры образующих окружностей которых расположены на расстоянии 1,5 мм. Носовая часть преграды располагается на расстоянии 50 мм от входа в канал. Угол наклона крыла составлял 4°. Расчетная сетка включала в себя $2,3 \cdot 10^6$ ячеек. В области тела обтекания было произведено измельчение сетки. Число Куранта в расчете не превышало 0,5. Рабочая жидкость – вода. Предполагалось, что в потоке в области тела обтекания образуется вторая фаза – водяной пар.

В качестве управляющих уравнений для описания динамики трехмерного двухфазного нестационарного обтекания крылового профиля с нанесенной

структурированной шероховатостью в щелевом канале использовались уравнения Навье-Стокса. Для описания турбулентности была выбрана $k-\omega$ модель. Для определения границ между паровой фазой и водой использовался метод VOF (volume of fluid) с применением схемы захвата границ раздела с высоким разрешением (HRIC).

Динамика роста разрушения кавитационных пузырьков описывалась моделью Рэлея-Плессета.

В качестве граничных условий на входе задавалось значение скорости и соотношение частей компонентов рабочей жидкости: 1 – вода, 0 – водяной пар. На выходе задавалось значение избыточного давления (0 атм), что соответствует условию свободного истечения, а соотношение частей компонентов менялось на: 0,98 – вода, 0,02 – водяной пар. Стенки канала и тело обтекания считались непроницаемыми, скорость течения на стенке полагалась равной 0 м/с.

Результаты

Для анализа процесса обтекания крылового профиля со структурированной шероховатостью в центральном сечении канала были построены поля концентрации (рис. 2а).

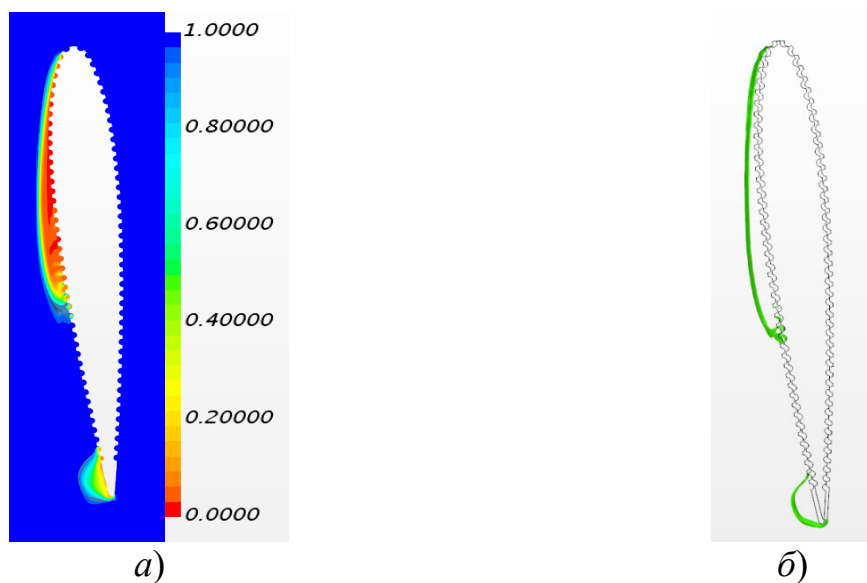


Рис. 2. Поле концентрации воды – а) и визуализация поверхности присоединенной каверны – б)

Присоединенная каверна образуется в носовой части крыла и растет вниз по потоку. Еще одно ядро зарождения и роста каверны располагается в хвостовой части крыла. Присоединенные каверны после образования сначала растут, а затем схлопываются с отрывом свободного кавитационного пузыря. На рис. 2(б) представлена визуализация прикрепленных кавитационных каверн.

На рис. 3 представлено векторное поле скоростей в области присоединенной кавитационной каверны. Видно, что направление потока в выемках шероховато-

сти противоположно скорости потока. Таким образом, можем утверждать, что в области каверны образуется область противотока.

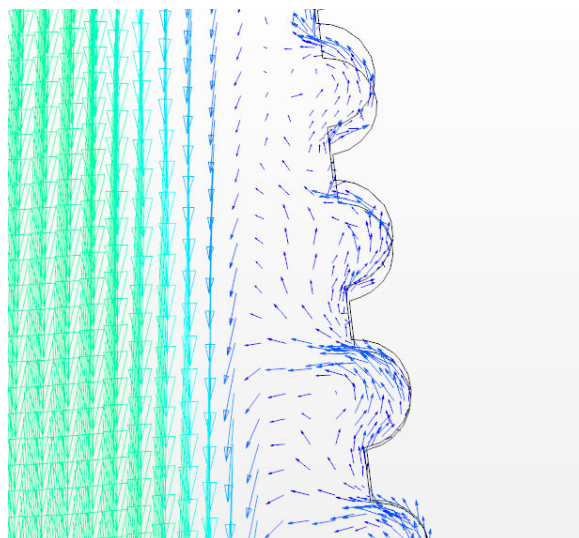


Рис. 3. Поле векторов скоростей под присоединенной кавитационной каверной

Заключение

Проведено моделирование кавитационного обтекания крыла с нанесенной структурированной шероховатостью. Построены поля концентрации, и визуализированы границы кавитационных каверн. Исследована структура течения вблизи тела обтекания.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Galinovskii, A.L. Corrosion: Materials, Protection Rationale and Prospects for Using Protection Methods for Surfaces of Marine Internal Combustion Engines from Cavitation. Steel Transl. 54, 293–297 (2024). <https://doi.org/10.3103/S0967091224700669>.
2. S. Skripkin, Z. Zuo, M. Tsoy, P. Kuibin, and S. Liu, “Oscillation of cavitating vortices in draft tubes of a simplified model turbine and a model pump–turbine 1 B,” *Energies* 15(8), 2965 (2022).
3. Fahri Ç. et al. Experimental investigation of leading-edge tubercle and surface corrugation effects on cavitation and noise in partially cavitating twisted hydrofoils. *Ocean Engineering*, Volume 324, 2025, 120646, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120646>.
4. Qianfeng Q. et al. Research progress in hydrofoil cavitation prediction and suppression methods. *Physics of Fluids* 1 January 2025; 37 (1): 011301. <https://doi.org/10.1063/5.0245462>.
5. Kashkarova M. V., Kravtsova A. Cavitation initiated by the circular cylinder in the slit channel. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, DOI: 10.1615/JFlowVisImage-Proc.2025057355.

© М. В. Кашкарова, С. В. Какаулин, К. С. Зубанов, А. Ю. Кравцова, 2025