

Д. В. Литвинова^{1,2}, М. В. Кашкарова¹, М. А. Воробьев¹, А. Ю. Кравцова^{1,2}*

Диагностика кавитационного течения методами компьютерного зрения

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г.
Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: kravtsova.alya@gmail.com

Аннотация. Разработан алгоритм диагностики кавитационных течений, возникающих в щелевых зазорах вблизи тел обтекания различной геометрии, методами компьютерного зрения. В результате применения разработанного алгоритма к видеоряду данных высокоскоростной визуализации получены характеристики кавитационных полостей при разных режимах течения.

Ключевые слова: алгоритм диагностики кавитационных течений, методы компьютерного зрения, кавитация, многофазный поток

D. V. Litvinova^{1,2}, M. V. Kashkarova¹, M. A. Vorobev¹, A. Y. Kravtsova^{1,2}*

Diagnostics of Cavitation Flow by Computer Vision Methods

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: kravtsova.alya@gmail.com

Abstract. The algorithm for diagnosing cavitation flows occurring in slits near different geometry bodies using computer vision methods has been developed. As a result of applying the developed algorithm to the video data of high-speed visualization the characteristics of cavities for different flow regimes were obtained.

Keywords: algorithm for diagnostics of cavitation flows, computer vision methods, cavitation, multiphase flow

Введение

Кавитация возникает в потоке при понижении давления ниже порогового значения давления образования паров воды. Схлопывание кавитационных пузырей вызывает эрозию поверхностей гидротехнического оборудования и разрушительно влияет на работу механизмов. Однако кавитационный удар может быть использован также для модификации или очистки поверхностей, улучшения механических свойств материалов и в других областях применения. Для технического использования кавитации необходимо умение анализировать поведение и характеристики возникающих парогазовых областей для повышения качества работы оборудования.

Классическая гидродинамика описывает жидкость как сплошную непрерывную среду. При кавитации жидкость теряет свою сплошность и непрерывность. Зачастую, кавитационное течение имеет нестационарный характер. Было выяснено, что рост парогазовых полостей происходит периодически [1]. Периодическое изменение каверны вызывает колебания давления и скорости в потоке, которые приводят к возникновению шума, пульсаций скорости и давления и, как следствие, негативно влияют как на работу отдельных механизмов, так и гидроагрегатов в целом. Чтобы корректно охарактеризовать поведение кавитации и предсказывать развитие кавитационных полостей во времени, необходимо владеть определенным набором параметров, таких как положение каверны в потоке, ширина и длина парогазовой полости, время ее роста и схлопывания и многими другими.

До недавнего времени описание гидродинамики нестационарных, многофазных потоков имело множество допущений и неточностей. После появления высокоскоростных камер (с частотой съемки до 1 МГц) и программной обработки данных появилась возможность выполнить более подробный анализ кавитационных течений. Однако, эффект кавитации до сих пор не имеет полного обоснования и все еще вызывает интерес у многих ученых. Одним из самых популярных и важных исследований является изучение кавитации вблизи тел обтекания различной геометрии.

Важным аспектом в измерении размеров является точное определение местоположения парогазовой области в потоке [2]. Так, в предыдущих работах было исследовано влияние постепенного увеличения и уменьшения угла атаки на частичную кавитацию на профилированных телах обтекания – крыльях НАСА0015 [3]. Для определения длины были усреднены по интенсивности пикселей 12 видео рядов. За среднюю длину каверны принимали длину участка на изображении, имеющего интенсивность близкую к нулю [4]. В другой работе детектирование кавитационных облаков происходило с помощью выделения границ на бинарном изображении после применения сглаживания картинки [5]. Далее производилось выделение на изображении парогазовых облаков эллипсами с последующим временным анализом полученных метрик. С помощью функции цветового градиента между соседними пикселями выше порогового значения были получены границы каверны. Погрешность измерений составляла до 15% [5]. Зачастую, оценка размерных характеристик кавитационных полостей производится вручную по видимой для человеческого глаза границе парогазовой полости на каждом кадре, что значительно влияет на ход измерений и увеличивает время анализа данных [6–8]. Используются методы одновременного детектирования кавитационных полостей различными способами, например, лазерной визуализацией и ультразвуковой импульсной эхографией с последующей обработкой данных [2]. Производится покадровое усреднение интенсивности с последующей обработкой изображения и аппроксимацией границы пузыря с помощью полиномиальных функций. Область с интенсивностью выше 80% от максимальной яркости изображения принималась за границу каверны. Это позволяло качественно оценить изменение размеров кавитационных полостей при увеличении

скорости набегающего потока, однако количественные измерения требовали уточнений. Таким образом, к настоящему моменту стало очевидно, что для более глубокого понимания динамики развития кавитационных полостей необходимо создать систему анализа данных на основе современных способов обработки, позволяющую проводить оценки полостей более точно в динамике и более быстро по времени.

Целью работы являлась разработка алгоритма анализа данных высокоскоростной визуализации кавитационных течений с низкой погрешностью измерений.

Исходные данные

Данные высокоскоростной визуализации были получены для кавитационного течения, возникающего за крылом, профиль которого выполнен по полиному четвертой степени модельного тела обтекания NASA0012. Длина хорды крыла составляла 60 мм. Крыло являлось двумерным. Размах крыла равен 1,2 мм. Тело обтекания было зажато в щелевом зазоре с высотой 1,2 мм таким образом, что размах крыла совпадал с высотой щелевого зазора.

Для фиксации мгновенных картин кавитационного течения во времени была использована высокоскоростная камера photron fastcam s12 nova. Частота съемки составляла 30 000 к/с. Засветка измерительной области была проведена светодиодным прожектором мощности 20 000 лм с матовым стеклом. Подробное описание экспериментального стенда, экспериментального оборудования и результаты измерений можно найти в работе Skripkin et al. 2022 года [8]. Данные высокоскоростной визуализации, представленные в работе [8], были использованы для дальнейшего анализа и разработки алгоритма диагностики кавитационных течений.

Алгоритмический анализ

Для определения размерных характеристик нестационарных кавитационных полостей использовалась среда MATLAB. Первым этапом обработки являлось вычисление среднего изображения по всему видеоряду на основе попиксельного сложения интенсивностей каждого кадра, деленное на количество кадров. На следующем шаге, с целью удаления с каждого из кадров видеоряда недвижущихся и неизменяющихся объектов, производилось вычитание среднего изображения. Результатом этим шагов вычитания являлись парогазовые полости с отсутствием тела обтекания на изображении, что делает алгоритм универсальным, не привязанным к исследуемому объекту обтекания и подходящим для дальнейшей диагностики кавитационных полостей, возникающих вблизи объектов любой формы.

Следующий шаг – это конвертирование получившихся изображений с аддитивной цветовой моделью rgb с типом данных δint к полутоновой интенсивности I с помощью функции `im2gray`. Диапазон интенсивности I от 0 до 255. На этом шаге устраняются оттенки и информация о насыщении при сохранении яркости. Другими словами, уменьшается размерность матриц с трехмерных до двумерных.

Далее был применен медианный фильтр `medfilt2` для сглаживания границы области и дополнительного удаления с изображения визуальных шумов и малых парогазовых полостей, которые вызывают трудности при определении границ каверн.

Для увеличения вычислительной скорости программы и во избежание использования динамической памяти создаются два массива фиксированного размера, заполненные нулевыми значениями. Определение внешней границы каверны выполняется с помощью поиска пикселей с фиксированной координатой x и максимальным значением координаты по оси y со значением интенсивности выше 30 с помощью функции `find`. Нулевым значениям массива присваивались определенные значения координат x и y . Определение длины кавитационной полости вдоль по потоку в каждый момент времени происходит так: последний элемент массива – это дальний пиксель от начала парогазовой области, а первый элемент массива – это начало кавитационной полости. Наименьшее расстояние между этими двумя пикселями определяется, как длина каверны вдоль по потоку.

Для определения ширины полости используется тот же подход, только с фиксированной координатой y . Поиск максимальной ширины осуществляется функцией `fminbnd`.

Оценка погрешности измерений составила менее 1%, что является хорошим показателем при диагностике кавитационных течений.

В результате применения разработанного алгоритма к видеоряду данных высокоскоростной визуализации были получены характеристики кавитационных полостей при разных режимах течения (или расходах жидкости) от 5,6 м³/час до 7,8 м³/час. Динамика изменения размерных характеристик по времени позволит в дальнейшем оценить частотные характеристики кавитационного течения.

Заключение

В результате выполнения работы был разработан алгоритм диагностики кавитационных полостей в щелевых зазорах. Алгоритм позволяет определять размерные характеристики полостей, такие как динамическое изменение длины и ширины. Алгоритм является универсальным, позволяя анализировать кавитационные полости, возникающие за различными видами уступов и тел обтекания. Погрешность измерений составляет менее 1%.

В результате применения разработанного алгоритма к видеоряду данных высокоскоростной визуализации были получены характеристики кавитационных полостей при разных режимах течения (или расходах жидкости) от 5,6 м³/час до 7,8 м³/час и продемонстрирована его общность.

Благодарности

Исследование выполнено за счет средств государственного задания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Болотин А. Ф. Исследование характера деформации каверны в несжимаемой жидкости // Доклад 12-й конференции секции мореходных качеств судов. Крыловские чтения. – Л., 1962.
2. Felici A., Di Felice F., Pereira F. A. Measurement of the cavitation pattern by two non-intrusive techniques: laser imaging and ultrasound pulsed echography // *Exp Fluids* 54, 1482 (2013).
3. Seyfi S., Nouri N-M. Experimental studies of hysteresis behavior of partial cavitation around NACA0015 hydrofoil // *Ocean Engineering*. – 2020. – №217. – P. 20–35.
4. Jahangir S., Hogendoorn W., Poelma C. Dynamics of partial cavitation in an axisymmetric converging-diverging nozzle // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2018. – №106. P. 34–45.
5. Hutli E., Petrović P. B., Nedeljkovic M. et al. Automatic Edge Detection Applied to Cavitating Flow Analysis: Cavitation Cloud Dynamics and Properties Measured through Detected Image Regions // *Flow Turbulence Combust.* – 2022. – №108. – P. 865–893.
6. Brennen C. E. 1995. "Cavitation and bubble dynamics". Oxford Univ. Press.
7. Coutier-Delgosha O., Stutz B., Vabre A., Legoupil S. Analysis of cavitating flow structure by experimental and numerical investigations // *J. Fluid Mech.* – 2007. – V. 578. – P. 171–222.
8. 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. – P. 12:11182.

© Д. В. Литвинова, М. В. Кашкарова, М. А. Воробьев, А. Ю. Кравцова, 2024