Визуализация мультицветной водного потока методом анемометрии по изображениям частиц

Ш.Ш.Усманова¹, Н.М.Скорнякова¹, С.Ю. Белов¹, М.В.Сапронов¹

¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Красноказарменная ул., 14, Москва, 111250, Россия

Аннотация

Работа посвящена исследованию водного потока, созданного с помощью помпы в кювете с жидкостью методом мультицветной анемометрии по изображениям частиц. Метод мультицветной анемометрии по изображению частиц является еще одной модификацией метода анемометрии по изображениям частиц. Основное отличие метода от других модификаций в том, что в качестве зондирующего излучения применяется не одна лазерная плоскость, а несколько лазерных плоскостей, причём разных длин волн. Подобная модернизация позволяет получать векторные поля скоростей одновременно в нескольких плоскостях. В работе сформулирован алгоритм проведения измерений методом мультицветной анемометрии по изображениям частиц и обработки регистрируемых данных. Разработана экспериментальная установка и проведена серия экспериментов, в результате которой была визуализирована структура исследуемого потока, получены векторные поля скоростей в трех лазерных плоскостях.

Ключевые слова

Мультицветная анемометрия по изображениям частиц, объёмное поле скоростей потока, 3D визуализация потока.

Visualization of Water Flow by Multicolor Particle Image Velocimetry

S.S. Usmanova¹, N.M. Skornyakova¹, S. Yu. Belov¹, M. V. Sapronov¹

¹National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Krasnokazarmennava, 14, Moscow, 111250. Russia

Abstract

The work is devoted to the study of the water flow created by a pump in a cuvette by multicolor particle image velocimetry. Multicolor particle image velocimetry method is another modification of the particle image velocimetry. The main difference between this method and other modifications is that not one laser plane is used as probing radiation, but several with different wavelengths. Such modernization makes it possible to obtain velocity vector fields simultaneously in several laser planes. The paper describes an algorithm for carrying out measurements using multicolor particle image velocimetry and processing the recorded data. An experimental setup has been developed and a series of experiments has been carried out, as a result of which the structure of the flow under study has been visualized, vector velocity fields in three laser planes have been obtained.

Keywords

Multicolor particle image velocimetry, three-dimensional flow velocity field, 3D flow visualization.

ORCID: 0000-0001-7674-5103 (Ш.Ш. Усманова); 0000-0002-2919-6428 (Н.М. Скорнякова); 0000-0001-8623-9503 (С.Ю. Белов); 0000-0002-8600-2036 (М.В. Сапронов)



© 2022 Copyright for this paper by its authors. Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ГрафиКон 2022: 32-яМеждународнаяконференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

EMAIL: shirinusmanova25@mail.com (Ш.Ш. Усманова); nmskorn@mail.ru (Н.М. Скорнякова); belovstas@mail.ru (С.Ю. Белов); makssapronov@yandex.ru (М.В. Сапронов)

1. Введение

Изучению газовых и жидкостных потоков посвящено множество теоретических и экспериментальных работ. Подобный интерес к исследованию этих явлений, в первую очередь, обусловлен их широким распространением в природе [1]. Наряду с этим, большое внимание к данной теме также вызвано широким применением газовых и жидкостных течений в различных областях современной науки и техники. В частотности, применительно к ракетостроению, закрученные потоки реализуются в центробежных форсунках жидкостных ракетных двигателей, вращающихся ракетах, системах пленочного охлаждения сопловых блоков, вихревых камерах сгорания, системах управления модулем тяги [2, 3]. В том числе сильно закрученные потоки получили широкое применение в циклонных сепараторах, предназначенных для очистки газа и топлива, в горелочных устройствах с целью стабилизации пламени. Для оптимизации процесса смешения потоков в подобных устройствах важно понимать структуру потока и механизм смешения. Также разнообразные устройства с закруткой потока используются в целом ряде отраслей народного хозяйства: вихревые камерные реакторы в химической технологии, центробежное литье в металлургии, вихревые и турбинные расходомеры в измерительной технике [4–10].

Метод анемометрии по изображению частиц (АИЧ) в настоящее время является одним из широко используемых методов диагностики и визуализации потоков в газовых и жидких средах. В отличие от одноточечных методов диагностики АИЧ позволяет регистрировать мгновенные пространственные распределения скорости в плоскости, что особенно необходимо в случае диагностики потоков сложной структуры.

Принцип работы метода основан на предварительном введении частиц-трассеров малого размера в поток среды и последующем наблюдением за траекториями их движения. Для АИЧ измерений исследуемая область освещается лазерной плоскостью, в которой производится измерение смещения частиц за известное время между двумя последовательными кадрами. Как правило, в качестве источника излучения чаще всего применяют твердотельный импульсный Nd: YAG лазер, для записи положения частиц используют фотоплёнку или цифровую камеру.

Основным достоинством метода является возможность измерения распределения скорости потока и его визуализации в плоскости в некотором сечении исследуемого объема. В силу своих возможностей АИЧ находит широкое применение при проведении целого ряда разнообразных исследований в различных областях науки и техники. Но чаще всего применяется для исследования потоков газов и жидкостей [11, 12].

Передовые на сегодняшний день модификации метода АИЧ для исследования потока, такие как стерео или томографический метод АИЧ позволяют получать наиболее полную информацию о его структуре по сравнению со стандартным плоскостным методом исследования АИЧ. Основным достоинством этих методов является возможность измерения распределения скорости потока и его трехмерной визуализации [13, 14].

Метод мультицветной анемометрии по изображению частиц является еще одной модификацией метода АИЧ. Основное отличие метода от других модификаций в том, что в качестве зондирующего излучения применяется не одна лазерная плоскость, а несколько лазерных плоскостей, причём разных длин волн. Подобная модернизация позволяет получать векторные поля скоростей одновременно в нескольких плоскостях и визуализировать трехмерную структуру исследуемого потока [15–18].

2. Экспериментальная установка и методика измерений

В основу принципа работы экспериментальной установки для определения распределения скорости исследуемого потока был положен метод мультицветной анемометрии по изображениям частиц (МАИЧ).

Сущность МАИЧ заключается в регистрации положения частиц-трассеров в рассеянном свете, которые искусственно вводятся в поток, через небольшие интервалы времени. При этом частицы должны двигаться со скоростью потока и не вносить в него никаких возмущений. Для выполнения этих условий необходимо, чтобы частицы были малы, а их плотность близка к

плотности потока. В методе МАИЧ в качестве зондирующего излучения используются красная, зеленая и синяя параллельные лазерные плоскости, расположенные на равном расстоянии друг от друга. Лазерные модули подбираются таким образом, чтобы при разделении экспериментального изображения, по трём цветам, сигнал от каждой лазерной плоскости преимущественно присутствовал только в одном из трех цветовых каналов. Регистрация положения частиц-трассеров в потоке осуществляется с помощью цветной цифровой фотокамеры.

В результате МАИЧ измерений полученные изображения будут иметь три цветовые RGB компоненты. И если применить кросскорреляционную обработку к каждой паре изображений по каждому цветовому каналу в программе Pivview, возможно получить векторное поле скоростей исследуемого потока в трех различных плоскостях. В свою очередь, используя результаты обработки экспериментальных изображений, можно определить распределение вертикальной и горизонтальной составляющих векторов скорости частиц по заданным сечениям потока. Затем, выполнив построение в пространстве распределений вертикальной и горизонтальной компонент скорости для множества сечений потока в каналах красного, зеленого и синего цветов и проведя аппроксимацию полученных плоскостей, появляется возможность визуализировать трёхмерное поле скоростей исследуемого потока.

Схема экспериментальной установки для диагностики скорости потока методом МАИЧ приведена на рисунке 1. Источником зондирующего излучения 1служил блок формирования лазерных плоскостей, включающий в себя три источника лазерного излучения длин волн 450 нм, 550 нм и 615 нм, и оптическую систему. В качестве объект исследования был рассмотрен поток, созданный с помощью помпы 2 в кювете 3 с жидкостью. Рассеянное излучение регистрировалось с помощью приемной оптической системы 4, представляющей собой цветную цифровую камеру и объектив. Регистрирующая система устанавливалась на отдельную оптическую скамью, таким образом, чтобы было возможно свободно перемещать её вдоль плоскости, параллельной ближней стенки кюветы. Перед проведением эксперимента жидкость в кювете предварительно была засеяна частицами-трассерами, представляющими собой стеклянные сферы радиусом до 100 нм.



Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

За область регистрации была принята область кюветы, выделенная на рисунке 2 красным квадратом. В результате МАИЧ измерений регистрировалось рассеянное стеклянными сферами лазерное излучение от трёх RGB плоскостей. Запись производилась с частотой съёмки 60 кадров/с. Каждое регистрируемое изображение, содержало информацию о распределении

векторного поля скоростей потока в трех плоскостях, расположенных на расстоянии 3 мм друг от друга. Толщина лазерных плоскостей составляла 2 мм.

На рисунке 2 приведены экспериментальные кадры, полученные в разные временные интервалы. Как видно из рисунка 2, исследуемый водный поток имел структуру сходную тороидальному вихрю. Причём размеры этой структуры увеличились со временем таким образом, что часть потока стала попадать в синюю и красную лазерные плоскости.



Рисунок 2 – Примеры экспериментальных изображений

3. Обработка экспериментальных результатов

Обработка экспериментальных данных осуществлялась следующим образом. Каждое экспериментальное изображение предварительно раскладывалось по трем цветовым RGB каналам. На рисунке 3 приведен пример разложения одного из экспериментальных изображений.



Рисунок 3 – Пример разложения экспериментального изображения по тремRGB каналам

Далее к паре изображений, соответствующих определенному цветовому каналу применялся кросскорреляционный анализ. После чего рассчитанные значения скорости выводились из программы в виде текстового файла, и на их основе производилось построение трехмерного поля скоростей.

На рисунках 4–6 показан пример кросскорреляционной обработки над одной из пар экспериментальных изображений. Как видно из изображений, в каждой из плоскостей наблюдается изменение скорости смещения трассирующих частиц.



Рисунок 4 – Синяя лазерная плоскость



Рисунок 5- Зеленая лазерная плоскость



Рисунок 6- Красная лазерная плоскость

4. Заключение

В ходе работы была собрана экспериментальная установка, в основу принципа работы которой был положен метод мультицветной анемометрии по изображениям частиц. Следует отметить, что для корректной работы метода необходимо подбирать источники лазерного излучения синего, зеленого и красного цвета таким образом, чтобы при разложении изображения по трем цветовым каналам сигнал от каждой из плоскостей преимущественно присутствовал только в одном из каналов. На основе разработанной экспериментальной установки был исследован поток, созданный с помощью помпы в кювете с водой. В результате эксперимента была визуализирована структура исследуемого потока. Поток имел тороидальную структуру. Причём размеры этой структуры увеличились со временем таким образом, что часть потока стала попадать в синюю и красную лазерные плоскости.

5. Список источников

- [1] Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н. М.: Физматлит, 2011.344 с.
- [2] Development of Injector Spray Targeting by Coupling 3DCFD Simulations with Optical Investigations / A.Vacca [and etc.] // SAE Technical Papers 2020. № 2020-01-1157. P. 1–9.
- [3] Глебов Г.А., Высоцкая С.А. Моделирование когерентных вихревых структур и автоколебаний давления в камере сгорания РДТТ // Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей. 2016. № 4(19). С. 41–48.
- [4] Hydrodynamics and velocity measurements in gas-liquid swirling flows in cylindrical cyclones / R. Hreiz [and etc.] // Chemical Engineering Research and Design. 2014. № 11. P. 2231–2246.
- [5] Study on the Air Core Formation of a Gas–Liquid Separator / J. Yin [and etc.] // Journal of Fluids Engineering ASME. 2015. № 091301. P. 1-9.
- [6] Пузырёв Е.М., Голубев В.А. Разработка вихревых топок для энергетических котлов// Энергетик. 2017. № 4. С. 44–47.
- [7] Approaches for detailed investigations on transient flow and spray characteristics during high pressure fuel injection/ N.Kawaharada [and etc.] // Applied Sciences (Switzerland). 2020. № 4410. P. 1–22.
- [8] Yu, W.; Yang, W.; Zhao, F. Investigation of internal nozzle flow, spray and combustion characteristics fueled with diesel, gasoline and wide distillation fuel (WDF) based on a

piezoelectric injector and a direct injection compression ignition engine // Applied Thermal Engineering. 2017. № 114. P. 905–920.

- [9] Numerical and Experimental Study on Internal Nozzle Flow and Macroscopic Spray Characteristics of a Kind of Wide Distillation Fuel (WDF)-Kerosene / W. Yu [and etc.] // SAE Technical Paper. 2016. № 2016-01-0839. P. 1–15.
- [10] Time-resolved 3D imaging of two-phase fluid flow inside a steel fuel injector using synchrotron X-ray tomography / A. Tekawade [etc.] // Scientific Reports. 2020. № 8674. P. 1–10.
- [11] Particle image velocimetry / M. Raffel[and etc.] P.: Springer International Publishing, 2018.
- [12] Знаменская И.А. Методы панорамной визуализации и цифрового анализа теплофизических полей. Обзор. [Электронный ресурс] // Научная визуализация. 2021. № 3. URL: http://sv-journal.org/2021-3/13/?lang=ru (дата обращения 10.06.2022).
- [13] Stereoparticleimagevelocimetrysetupformeasurementsinthewakeofscaledwindturbines / G. Campanardi [and etc.] // Journal of Physics: Conference Series. 2017. № 1. P. 1–17.
- [14] Stereo PIV measurement of vortices in a model pump intake / G. Miao, T. Xuelin, L. Xiaoqin, W. Fujun // IOP Conf. Series: Earthand Environmental Science. 2019. № 072020. P. 1–10.
- [15] Development of the optical electronic setup for carrying out measurements by multicolor Particle Image Velocimetry / S.S. Usmanova [and etc.] Journal of Physics: Conference Series. 2021. № 012018.P. 1–8.
- [16] Rainbow particle imaging velocimetry for dense 3D fluid velocity imaging // J. Xiong [and etc.] // ACM Transactions on Graphics. 2017. № 4. P. 1–14.
- [17] Reconfigurable rainbow PIV for 3D flow measurement / J. Xiong, F. Qiang, R. Idoughi, W. Heidrich // Conference Paper IEEE International Conference on Computational Photography. 2018. P. 1–9.
- [18] Ruck B. Colour-coded tomography in fluid mechanics // Optics and Laser Technology. 2011. № 43. P. 375–380.