

Визуализация водного потока в стеклянной трубке методом мультицветной АИЧ

Ш.Ш. Усманова¹, Н.М. Скорнякова¹, М.В. Сапронов¹, Д.В. Софуюев¹, А.В. Кучменко¹
В.В. Неткачев¹

¹ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Красноказарменная улица, дом 14, Москва, 111250, Россия

Аннотация

Работа посвящена исследованию структуры водного потока, сформированного в стеклянной трубке с внешним диаметром 10 мм методом мультицветной анемометрии по изображениям частиц. Метод мультицветной анемометрии по изображениям частиц (МАИЧ) является одной из современных модификаций метода анемометрии по изображениям частиц. Главное отличие метода МАИЧ от классического метода анемометрии по изображениям частиц заключается в количестве зондирующих лазерных плоскостей. Для МАИЧ измерений предполагается использовать три лазерных плоскости красного, зеленого и синего излучения. Подобная модернизация позволяет визуализировать структуру потока и получать векторные поля скоростей одновременно в трёх плоскостях. В работе сформулирован алгоритм проведения измерений методом МАИЧ и обработки регистрируемых данных. Разработана и собрана экспериментальная установка, проведена серия МАИЧ измерений, в результате которой была визуализирована структура водного течения, получены векторные поля скоростей в трех лазерных плоскостях, построены распределения скоростей в горизонтальном сечении трубки.

Ключевые слова¹

Мультицветная анемометрия по изображениям частиц, диагностика потоков, визуализация структуры потока, 2D поле скоростей.

Visualization of Water Flow by Multicolor PIV

S.S. Usmanova¹, N.M. Skornyakova¹, M.V. Sapronov¹, D.V. Sofuyev¹, A.V. Kuchmenko¹,
V.V. Netkachev¹

¹National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Krasnokazarmennaya 17, Moscow, 111250 Russia

Abstract

The work is devoted to the study the water flow structure formed in a glass tube with an outer diameter of 10 mm by multicolor particle image velocimetry (MPIV). The multicolor particle image velocimetry method is one of the modern modifications of the particle image velocimetry. The main difference between MPIV and classical particle image velocimetry is the number of probing laser planes. Three laser planes of red, green and blue radiation are supposed to be used for MPIV measurements. Such modernization makes it possible to visualize the flow structure and obtain velocity vector fields simultaneously in three planes. The paper formulates an algorithm for carrying out MPIV measurements and processing the recorded data. An experimental setup was developed and assembled, a series of MPIV measurements was carried out, the structure of the water flow was visualized, velocity vector fields in three laser planes were obtained, velocity distributions in the horizontal section of the tube were constructed.

ГрафиКон 2023: 33-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия
EMAIL: shirinusmanova25@mail.ru (Ш.Ш. Усманова); nmskorn@mail.ru (Н.М. Скорнякова); maks-sapronov@yandex.ru (М.В. Сапронов); dsoufuev@inbox.ru (Д.В. Софуюев); kuchmenkoav@yandex.ru (А.В. Кучменко); goddu20@gmail.com (Неткачев В.В.)
ORCID: 0000-0001-7674-5103 (Ш.Ш. Усманова); 0000-0002-2919-6428 (Н.М. Скорнякова); 0000-0002-8600-2036 (М.В. Сапронов); 0009-0003-2579-5487 (Д.В. Софуюев); 0000-0003-1004-0252 (А.В. Кучменко); 0009-0005-7820-7823 (Неткачев В.В.)



© 2023 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Keywords

Multicolor particle image velocimetry, flow diagnostics, visualization of the flow structure, 2D velocity field.

1. Введение

Для решения современных задач в аэро- и гидродинамике, теплофизике и в других областях науки необходима информация о полном векторном поле скоростей потока в газовой или жидкой среде. Это приводит к необходимости разработки новых бесконтактных методов диагностики потоков, в частности комплексов позволяющих проводить измерения векторного поля скоростей и последующую трехмерную визуализацию структуры потока.

На сегодняшний день одним из широко используемых бесконтактных методов диагностики и визуализации потоков в газовых и жидких средах является метод анемометрии по изображению частиц. Анемометрия по изображениям частиц относится к пространственным методам исследования газовых и жидких потоков. В англоязычной литературе метод носит название Particle Image Velocimetry (PIV). В отличие от одноточечных методов диагностики АИЧ позволяет регистрировать мгновенные пространственные распределения скорости, что особенно актуально в случае диагностики потоков сложной структуры.

Касаемо практического применения анемометрии по изображению частиц, метод часто применяется для исследования и визуализации потоковых явлений в жидкостях и газах [1-3]. Также метод АИЧ может быть использован для проведения исследований обтекания различных объектов воздушным потоком, причем иногда совместно с другими методами, например, с градиентной теплотрией. Помимо этого, метод АИЧ с успехом применяется также и в исследованиях по гидродинамике, в которых рассматриваются, например, пленочное течение в жидкости или течения в испаряющейся капле.

Передовые на сегодняшний день модификации метода АИЧ, такие как стерео или томографический метод АИЧ, в отличие от классического метода АИЧ позволяют измерить пространственное распределение скорости потока и произвести трехмерную визуализацию его структуры [4-7]. Тем не менее, практическая реализация методов требует высокоточной калибровки системы камер, огромного объема дискового пространства и оперативной памяти для записи и последующей обработки экспериментальных данных. Также необходимо отметить, что в настоящее время одним из существенных недостатков, сдерживающих широкое распространение этих методов, является высокая стоимость оборудования, необходимого для их реализации на практике.

Существует еще одна модификация метода АИЧ. В англоязычных источниках она часто встречается под названиями «Reconfigurable Rainbow PIV», «Colour-coded tomography», «Multicolour Confocalmicro-Particle Image Velocimetry» и «Multicolor Particle Image Velocimetry» [8-10]. Основное отличие данной модификации от других в том, что в качестве зондирующего излучения применяется не одна лазерная плоскость, а несколько, причём разных длин волн. Подобная модернизация позволяет получать векторные поля скоростей одновременно в нескольких плоскостях. Тем не менее, пока не существует строго однозначного алгоритма реализации данного метода, поскольку он ещё находится в процессе активного развития.

В работе [8] для частичного устранения вышеописанных недостатков томографической АИЧ предлагается освещать исследуемый объём не одной лазерной плоскостью, а целым набором лазерных плоскостей на разных длинах волн. Подобная модификация позволяет сократить количество требуемых камер для томографической регистрации до одной. Тем не менее, как отметили сами авторы, не всегда результаты измерения многоцветной томографической АИЧ могут оказаться правдивыми, поскольку нет строгого соответствия между информацией, содержащейся в каком-либо цветовом канале, полученной при разложении экспериментального изображения на цветовые компоненты цифровыми методами, и информацией, переносимой оптическим сигналом соответствующего цвета. Эта проблема напрямую связана с тем, что лазерные плоскости «желаемых цветов» для освещения объёма потока предлагается получать путём смешивания синего, зелёного и красного излучения, а также с применением цветной видеокамеры в качестве приёмника.

В работе [9] для реализации метода реконфигурируемого радужного АИЧ авторы предлагают зондировать измерительную область несколькими световыми плоскостями, полученными путем применения цилиндрических линз и разложения белого света в спектр с помощью дифракционного элемента. Основным достоинством данной модификации является возможность значительного пространственного расширения измерительной области потока, за счёт применения дифракционного элемента и дифракционного объектива с варифокальным кодированием.

2. Методология мультицветной АИЧ и экспериментальная установка

К близким по сущности методам, описанным в работах [8-10], следует отнести метод мультицветной анемометрии по изображениям частиц (МАИЧ). Основное отличие МАИЧ от ранее рассмотренных методик заключается в обратном подходе подбора источников излучения. Исходя из спектральных характеристик существующих на рынке цветных видеокамер, для МАИЧ измерений в качестве зондирующего излучения предлагается использовать только три лазерных плоскости, причём разных длин волн, соответствующих синему, зеленому и красному цвету. Лазерные модули необходимо подбирать таким образом, чтобы при разделении экспериментального изображения по трём RGB цветам, сигнал от каждой плоскости присутствовал только в одном из трех цветовых каналов [10-13].

Принцип работы МАИЧ, аналогично как в методе АИЧ, основан на регистрации в рассеянном свете положения частиц-трассеров, которые предварительно вводятся в поток через небольшие временные интервалы. В результате МАИЧ измерений все экспериментальные изображения будут иметь три цветовые RGB компонента. Если к каждой паре изображений по каждому цветовому каналу применить кросскорреляционную обработку в соответствующей программе, возможно получить векторное поле скоростей исследуемого потока одновременно в трех плоскостях. В свою очередь, на основе результатов кросскорреляционной обработки можно построить распределения вертикального и горизонтального компонентов скорости потока по заданным сечениям потока. Далее, после осуществления аппроксимации полученных распределений в пространстве, появляется возможность визуализировать трёхмерное поле скоростей исследуемого потока.

Схема экспериментальной установки, позволяющей осуществлять МАИЧ измерения, представлена на рисунке 1. В качестве источников излучения были использованы три лазерных модуля (1) с длинами волн 450, 550 и 650 нм. Для формирования параллельных лазерных плоскостей в измерительной области потока была разработана оптическая система (2), включающая в себя два зеркала и три цилиндрических линзы. Регистрация положения частиц-трассеров производилась на цветную цифровую видеокамеру (3) Nikon 1 J5.

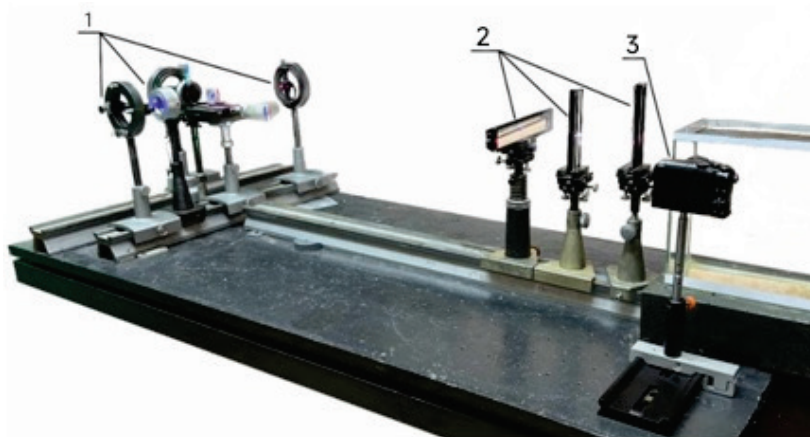


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

В качестве объекта исследования был рассмотрен ламинарный жидкий поток, созданный в стеклянной трубке с внешним диаметром 10 мм. Перед началом МАИЧ измерений трубка была помещена в кювету с жидкостью для уменьшения его оптической силы. Жидкость в трубке предварительно засеивалась частицами-трассерами, представляющими собой частицы сажи с линейными размерами в пределах от 70 до 100 мкм.

За область регистрации была принята область трубки, выделенная на рисунке 2 красным квадратом. В результате МАИЧ измерений регистрировалось рассеянное частицами сажи лазерное излучение от трёх RGB плоскостей. Запись производилась с частотой съёмки 60 кадров/с. В свою очередь, каждое экспериментальное изображения содержало информацию о распределении горизонтальной и вертикальной компоненты скорости потока одновременно в трех плоскостях, расположенных на расстоянии 1 мм друг от друга. Толщина лазерных плоскостей составляла чуть меньше 1 мм.

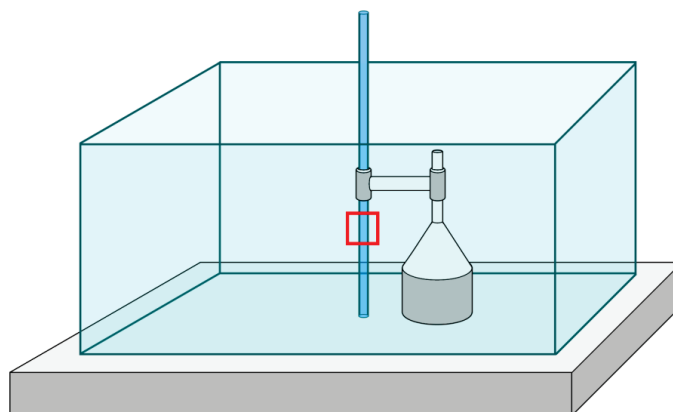


Рисунок 2 – Объект исследования

3. Обработка результатов МАИЧ измерений

Для обработки результатов МАИЧ измерений в первую очередь каждое экспериментальное изображение предварительно раскладывалось по трем цветовым RGB каналам. На рисунке 3 приведен пример разложения одного из экспериментальных МАИЧ изображений.

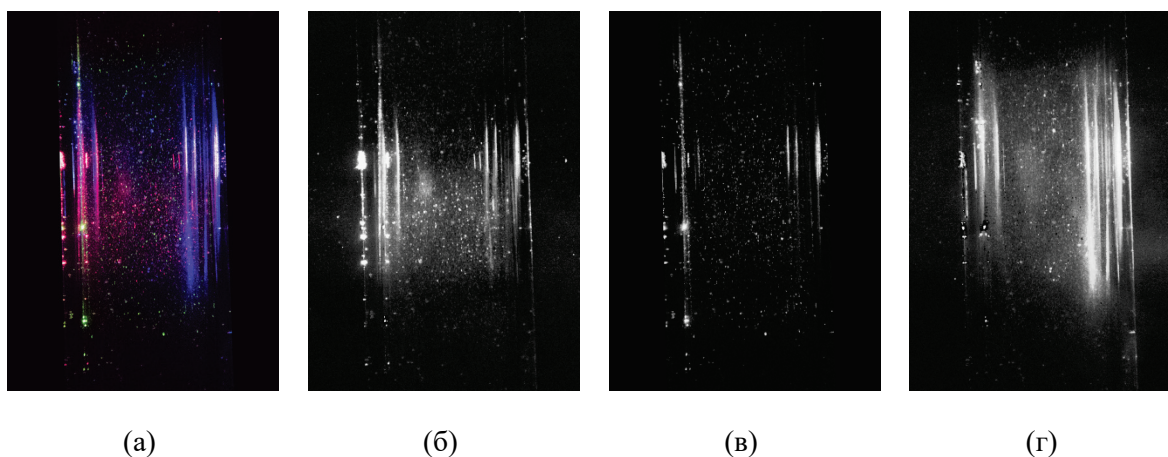


Рисунок 3 – Пример разложения экспериментального изображения по трем RGB каналам: (а) исходное изображение, (б) красный цветовой канал, (в) зеленый цветовой канал, (г) синий цветовой канал

Далее к каждой паре изображений по каждому цветовому каналу применялся стандартный кросскорреляционный алгоритм обработки в программе PIVviewd2C при окне опроса 256×256 пикселей. Перекрытие составляло 75%. В результате кросскорреляционного анализа рассчитанные значения скорости выводились из программы в виде текстового файла, и на их

основе производился дальнейший анализ структуры потока. На рисунке 4 приведен пример кросскорреляционной обработки одной из пар МАИЧ изображений.

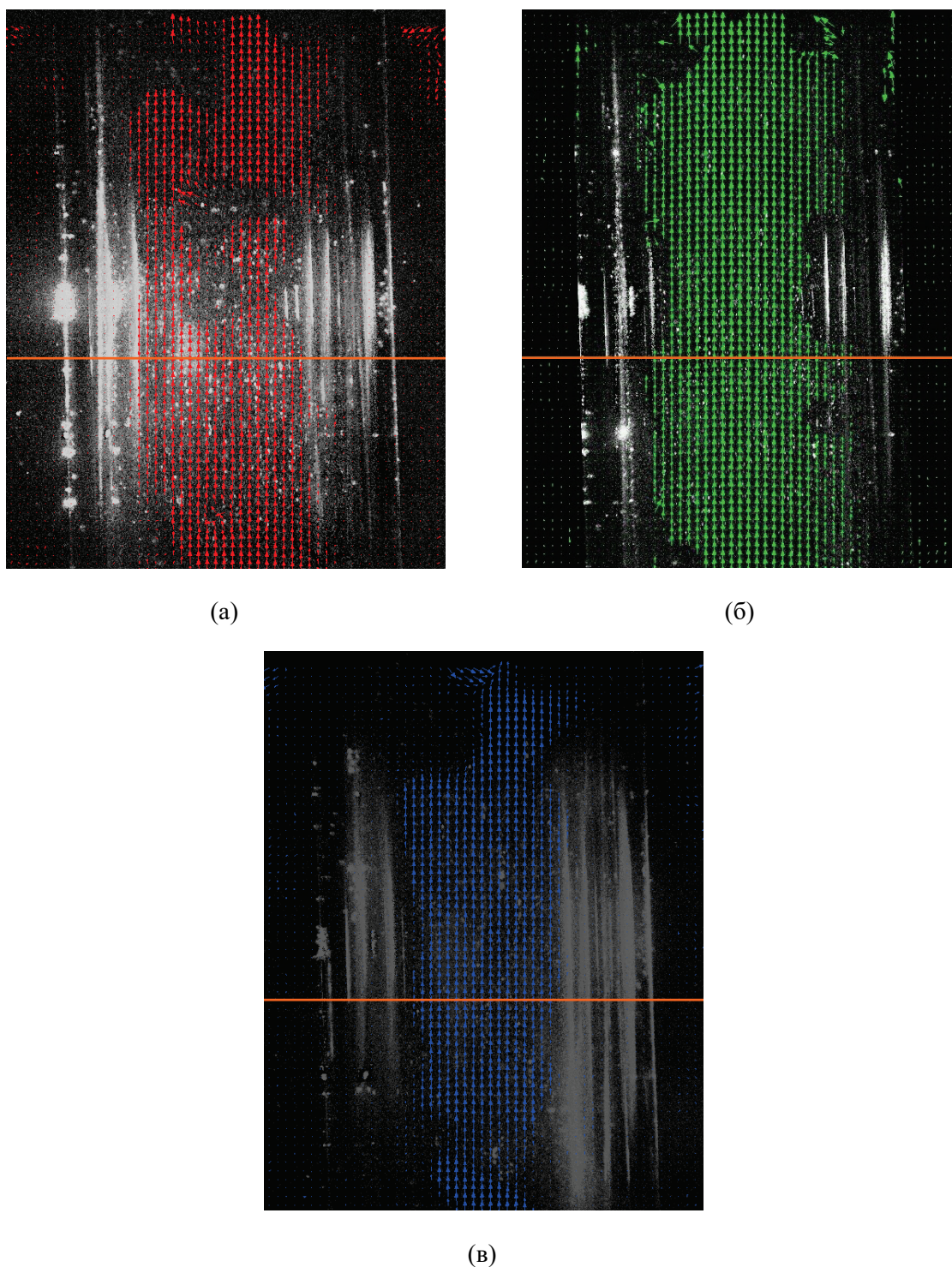


Рисунок 4 – Векторное поле скоростей: (а) в красной лазерной плоскости, (б) в зеленой лазерной плоскости, (в) в синей лазерной плоскости

Как видно из полученных векторных полей скоростей, для каждого цветового канала наблюдается изменение скорости смещения трассирующих частиц. При этом наибольшая скорость потока наблюдается в центре стеклянной трубки, а по краям скорость падает практически в два раза, что свидетельствует о том, что сформированный поток

преимущественно ламинарный. На основе полученных данных были построены распределения скоростей частиц вдоль выбранного сечения трубки (рисунок 5).

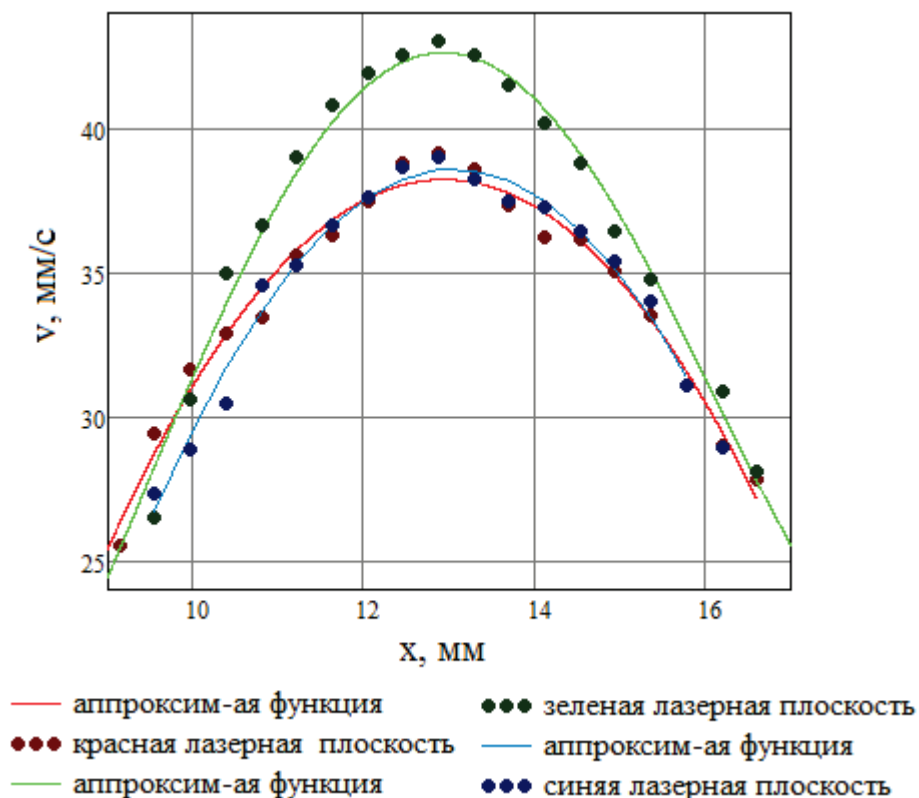


Рисунок 5 – Распределение скорости вдоль горизонтального сечения трубки

Полученные распределения скоростей трассирующих частиц лежат в диапазоне от 24,5 до 39,1 мм/с для красной лазерной плоскости, от 25,4 до 43,0 мм/с для зеленой лазерной плоскости и от 27,3 до 39,1 мм/с для синей лазерной плоскости. Как видно из векторных полей скоростей и распределения скоростей вдоль сечения, наибольшая скорость потока наблюдается в центре стеклянной трубки. А при удалении от центра трубки к краю скорость уменьшается по параболическому закону, что свидетельствует о ламинарности исследуемого потока.

4. Заключение

На основе метода мультицветной анемометрии по изображениям частиц была разработана экспериментальная установка и исследована структура жидкого потока, сформированного в стеклянной трубке с внешним диаметром 10 мм. В ходе проведения экспериментов была визуализирована структура водного течения, построены векторные поля скоростей и распределения скоростей частиц вдоль горизонтального сечения трубки в трех плоскостях, расположенных на расстоянии около 1 мм друг от друга. Как было получено из экспериментальных результатов, наибольшая скорость потока наблюдалась в центре стеклянной трубки, а ближе к краям трубки скорость стремительно падала по параболическому закону, что свидетельствует о ламинарности исследуемого потока. В дальнейшем планируется на основе экспериментальных данных визуализировать трехмерную структуру потока. Следует так же отметить, что полученные результаты исследования могут быть использованы для решения задач в области аэро- и гидродинамики, визуализации быстротекущих процессов и диагностики сложных вихревых структур.

5. СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Мочалова А.А., Варакасин А.Ю., Арбеков А.Н. Измерения полей скорости нестационарных воздушных вихрей методом анемометрии по изображениям частиц // Измерительная техника. 2019. № 3. С. 37–41.
- [2] Антоненков Д.А. Определение скорости течения водного потока с использованием методов визуализации [Электронный ресурс] // Научная визуализация. 2020. № 5. URL: <http://sv-journal.org/2020-5/09/?lang=ru> (дата обращения 30.06.2023).
- [3] Шадрин Е.Ю. PIV-исследование пространственной структуры потока в модели вихревой топки // Инновационная наука. 2016. № 4. С. 41–45.
- [4] 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.
- [5] Particle image velocimetry / M. Raffel [and etc.] P.: Springer International Publishing, 2018.
- [6] 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 30.06.2023).
- [7] Stereo particle image velocimetry set up for measurements in the wake of scaled wind turbines / G. Campanardi [and etc.] // Journal of Physics: Conference Series. 2017. № 1. P. 1–17.
- [8] Ruck B. Colour-coded tomography in fluid mechanics // Optics and Laser Technology. 2011. № 43. P. 375–380.
- [9] 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.
- [10] Rainbow particle imaging velocimetry for dense 3D fluid velocity imaging // J. Xiong [and etc.] // ACM Transactions on Graphics. 2017. № 4. P. 1–14.
- [11] Баюн С.В., Скорнякова Н.М. Исследование тепловых потоков методом мультицветной анемометрии по изображению частиц // Радиоэлектроника, электроника и энергетика: Двадцать вторая Междунар. науч.-техн. конф. Студентов и аспирантов (Москва, 3 мес. 2016 г.): сб. тезисов междунар. конференции / Организация. М.: Издательский дом МЭИ, С. 123.
- [12] The study of vortexes based on the multi colored particle image velocimetry technique / S.S. Usmanova, N.M. Skornyakova, A.V. Anikeev, O.A. Evtikhieva // Journal of Physics: Conference Series. 2019. P. 9.
- [13] 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.