

УДК 532.574.7

Сравнение различных типов трассеров в методе анемометрии по изображениям частиц

Колесников С.Ю.*, Скорнякова Н.М.**

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

ул. Красноказарменная, 14, Москва, 111250, Россия

**e-mail: 11ksu11@mail.ru*

***e-mail: nmskorn@mail.ru*

Аннотация

Работа посвящена исследованию зависимости измерений характеристик вихрей, полученных методом анемометрии по изображениям частиц (АИЧ), от типа используемых трассеров. Эксперимент проводился с применением 3-х типов трассеров: полиамидных частиц, полых стеклянных сфер и алюминиевой стружки. Исследуемый поток создается путем вращения лабораторной химической мешалки в объеме воды, в которую добавляются наблюдаемые маркеры. Построены поля скоростей вихрей в жидкости для насадки мешалки типа «крест», произведено сравнение полученных результатов.

Ключевые слова: анемометрия по изображениям частиц, трассеры, векторное поле скоростей, полиамидные частицы, полые стеклянные сферы

Введение

Анемометрия по изображениям частиц (АИЧ) применяется для измерения скорости в выбранном двумерном сечении или трехмерном объеме потока в гидро- и аэродинамических экспериментах [1-3]. Этот метод позволяет регистрировать поле мгновенного пространственного распределения скоростей. Метод АИЧ применяется, к примеру, для измерения скоростей газо-турбинных и авиационных двигателей и оптимизации обтекания летательных аппаратов [4-9]. Он обладает рядом достоинств, таких как отсутствие возмущающего влияния на поток и широкий динамический диапазон измеряемых скоростей [10-12].

Точность определения параметров потока определяется различными факторами. В частности, она зависит от светоотражающих частиц, служащих маркерами, по которым определяется скорость [13-18]. Их изображения являются опорными точками для расчета смещения частиц. Данное обстоятельство накладывает ограничение на применение методики АИЧ. К маркерам предъявляются определенные требования: они должны быть достаточно большими, чтобы их можно было распознать на изображении, и в то же время достаточно маленькими и легкими, чтобы в точности следовать за потоком [19]. В жидкостях также необходимо отслеживать, чтобы трассеры не всплывали на поверхность или не оседали на дно и стенки сосуда под воздействием сил, посторонних для исследуемого потока. Эта проблема исчезает, если маркерами выступают сами частицы наблюдаемого потока. Также на итоговый результат влияют форма и коэффициент отражения материала. В связи с этим есть несколько видов трассирующих частиц, применяемых в АИЧ экспериментах.

Целью данной работы является исследование зависимости полей скорости в жидкости от типа используемых маркеров.

Методика выполнения эксперимента

Исследование проводилось в аквариуме, наполненном водой (рисунок 1). Для создания вихревого потока использовалась лабораторная мешалка *ИКА-16*, крутящаяся со скоростью порядка 150 об/мин. В объем обычной бытовой воды помещалась крестообразная насадка мешалки с 4-мя лопастями, расположенными под углом 45° к горизонту. Наблюдаемая плоскость располагалась на расстоянии 1 см под плоскостью вращения креста насадки. В качестве источника излучения применялся импульсный Nd:YAG лазер, формирующий выходное излучение на длине волны 532 нм. Максимальная частота следования импульсов с длительностью 6 – 9 нс и энергией импульса 150 мДж составляет 16 Гц. Оптическая насадка с цилиндрической линзой формировала лазерную плоскость, которая подсвечивает исследуемые частицы в выбранной плоскости. Съемка изображений производилась ПЗС камерой Imager Pro SX 5M. Управление системой, сбор и обработка данных осуществлялись компьютером посредством программного обеспечения DaVis. Внешний вид использованных светоотражающих частиц представлен на рисунке 2, их характеристики приведены в таблице 1. Снимки были сделаны на электронном микроскопе.

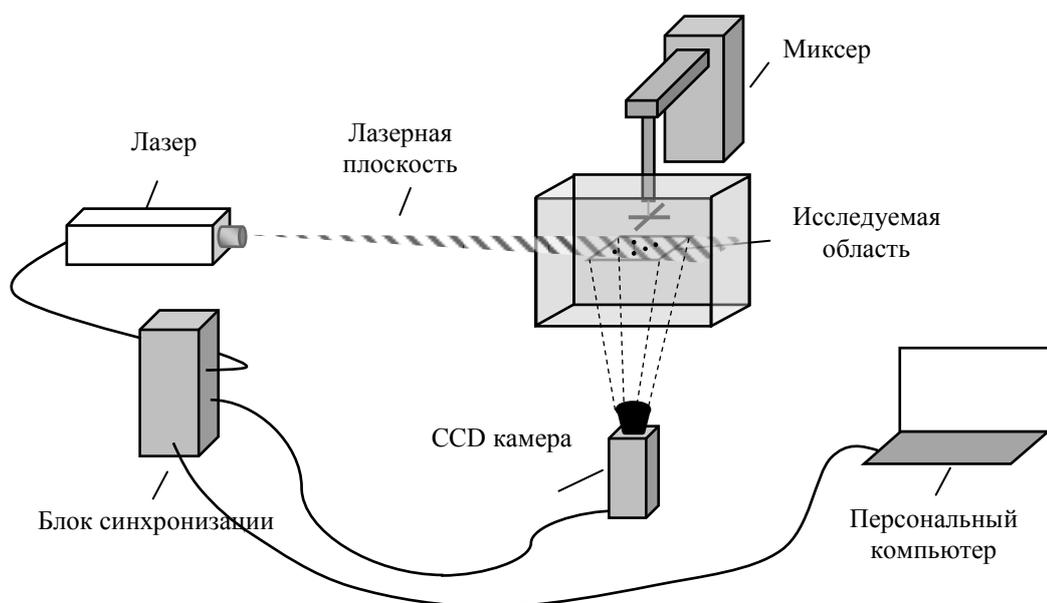


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Таблица 1

Характеристики различных типов трассеров

Наименование частиц	Средний размер	Материал	Характеристика
Алюминиевый порошок	20-40 мкм	Алюминий	Разнородная форма; высокий коэффициент отражения (>0,8)
Полиамидные частицы	20 мкм	Полилауринклактама	Небольшой разброс по размерам; практически идеальная сферическая форма; плотность, близкая к плотности воды.
Полые стеклянные сферы	9-13 мкм	Боросиликатное стекло	Форма сферическая, не пористая; плотность, близкая к плотности воды.

С каждым типом трассеров отдельно были проведены измерения скорости и построены поля векторов смещений для одного и того же режима вращения мешалки. Результаты эксперимента анализировались на предмет соответствия полей скоростей данным, полученным в схожих исследованиях [20].

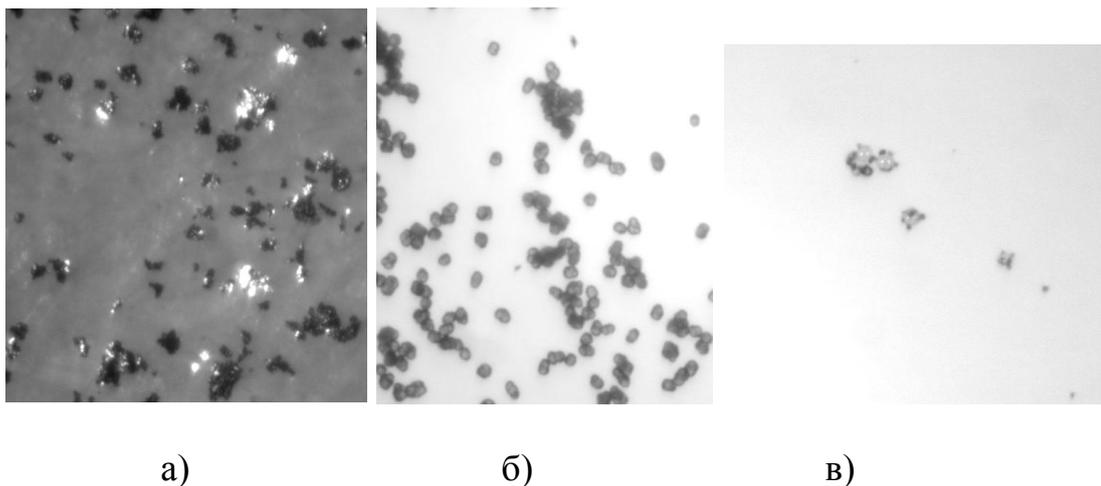


Рисунок 2 – Внешний вид 3-х видов трассеров: а – алюминиевый порошок, б – полиамидные частицы, в – полые стеклянные сферы.

Результаты экспериментов

Результаты работы свидетельствуют о том, что для данного класса экспериментов лучшие результаты показали полиамидные частицы. Гранулы алюминиевого порошка оказались слишком велики (средний размер 20-40 мкм) и разнородны по форме, а также обладали меньшей плотностью по сравнению с другими трассерами, вследствие чего часть их образовывала пленку на поверхности жидкости. Высокий коэффициент отражения привел к большому количеству засветок, что увеличивает количество ошибочных векторов при проведении кросскорреляционной обработки изображений. При уменьшении мощности

подаваемого излучения на изображении получалось недостаточное количество опорных точек. Стеклянные сферы и полиамидные частицы гораздо лучше справились с поставленной задачей (рисунок 3).

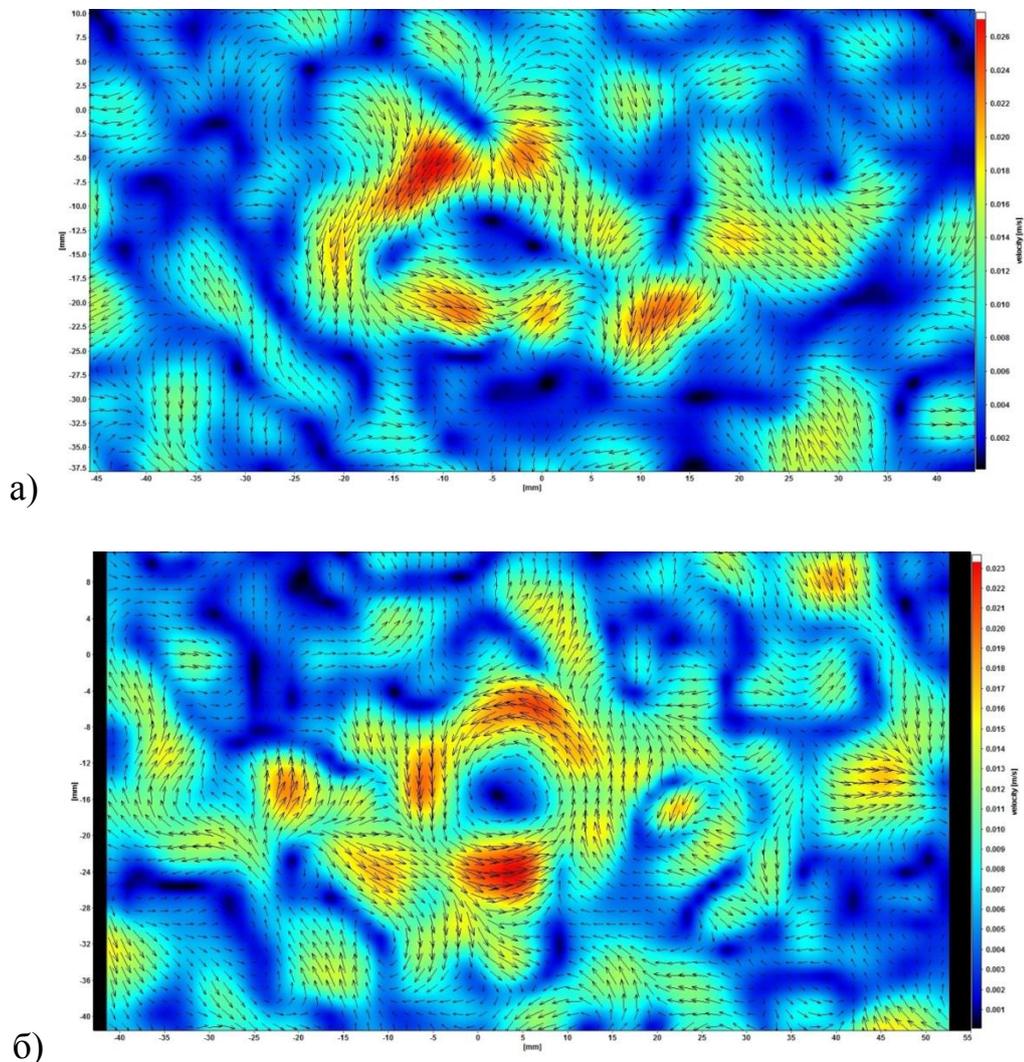


Рисунок 3 – Поле скоростей, полученное с использованием: а – стеклянных сфер; б – полиамидных частиц.

Полиамидные частицы показывают лучший результат: поле скоростей качественней показывает кольцевую структуру вихря, точно определяются координаты центра вихревого течения, значения скорости достаточно симметрично распределены относительно ядра, радиальная скорость меняется от 0,014 до 0,023

м/с. В первую очередь, это связано с тем, что плотность данных частиц близка к плотности воды, а средний размер порядка 20 мкм оптимален для проведения АИЧ измерений. Также материал, из которого изготовлены полиамидные частицы устойчив к температурам до 70°C. Данный вид трассеров равномерно засеивает весь объем частиц и каждая гранула отображается 1 – 5 пикселями, что является наилучшим вариантом для проведения постобработки.

Полые стеклянные сферы диаметром 10 мкм также можно использовать для данного вида экспериментов, используя дополнительную настройку системы и алгоритм обработки.

Заключение

Был исследован метод АИЧ для измерения полей скоростей в выбранном сечении потока жидкости с различными типами трассеров. Лучшие результаты были получены для полиамидных частиц, здесь наблюдалась наиболее четкая картина скоростей. Полые стеклянные сферы также можно использовать для данного вида экспериментов, используя дополнительную настройку системы и алгоритм обработки. Алюминиевые частицы самые легкие и имеют достаточно большой разброс размеров, но вместе с тем обладают самой большой отражающей способностью, вследствие чего на изображении достаточно много бликов и засветок и нельзя получить качественную обработку вихрей в данном эксперименте, однако они могут найти применения для других типов или методик проведения экспериментов.

Библиографический список

1. Adrian R.J. Twenty years of particle image velocimetry // Experiments in Fluids, 2005, no. 39 (2), pp. 159 - 169.
2. Raffel M., Willert C., Wereley S., Kompenhans J. Particle image velocimetry: a practical guide, New York, Springer, 2007, 448 p.
3. Adrian R.J., Westerweel J. Particle Image Velocimetry, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2010, 558 p.
4. Захаров Д.Л. Отработка методики измерений полей скоростей и концентраций с помощью PIV в течениях характерных для газо-турбинных двигателей // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=25391>
5. Костарев К.Г., Баталов В.Г., Мизев А.И., Сухановский А.Н., Шмыров А.В. Гидродинамические аспекты процессов формирования и распада топливной пленки, создаваемой форсункой камеры сгорания авиационного двигателя // Вестник Пермского научного центра УРО РАН. 2017. № 1. С. 52 - 56.
6. Znamenskaya I., Glazyrin F., Koroteeva E., and Naumov D. PIV investigation of low-pressure pulse discharge flow // 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-10), University of Naples Federico II, Italy Naples, Italy, 2015. pp. 153-1-153-5
7. Markovich D.M., Abdurakipov S.S., Chikishev L.M., Dulin V.M., Hanjalic K. Comparative analysis of low-and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions // Physics of Fluids, 2014, vol. 26, no. 6, pp. 065109.

8. Баталов В.Г., Степанов Р.А., Сухановский А.Н. Применение прямых оптических методов измерений для исследования характеристик двухфазного потока // Труды МАИ. 2014. № 76. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=50074>
9. Орлов А.В., Бражников М.Ю., Левченко А.А. Формирование крупномасштабного когерентного вихря в двумерной турбулентности // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 2018. Т. 107. № 3-4. С. 166 - 171.
10. Чикишев Л.М., Дулин В.М., Лобасов А.С., Маркович Д.М. О влиянии крупномасштабных вихревых структур на форму пламени в потоке закрученной струи // Горение и взрыв. 2018. Т. 11. № 2. С. 31 - 39.
11. Знаменская И.А., Глазырин Ф.Н., Дорощенко И.А. и др. Цифровая анемометрия по изображениям частиц в применении к ударно-волновым течениям // III отраслевая конференция по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов, КИМИЛА – 2018. Сборник трудов (Жуковский, 05-06 июня 2018). – Жуковский: Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, 2018. С. 292 - 301.
12. Войтков И.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Определение температуры газов при прохождении через них водного аэрозоля // Письма в журнал технической физики. 2017. Т. 43. № 6. С. 48 - 55.
13. Demauro E.P., Wagner J.L., Beresh S.J., Farias P.A. Unsteady drag following shock wave impingement on a dense particle curtain measured using pulse-burst PIV // Physical review fluids, 2017, vol. 2, no. 6, pp. 064301.
14. Ragni D., Schrijer F., van Oudheusden B.W., Scarano F. Particle tracer response across shocks measured by PIV // Experiments in Fluids, 2011, vol. 50, no. 1, pp. 53 - 64.

15. Legrand M., Nogueira J., Rodriguez P.A., Lecuona A., Jimenez R. Generation and droplet size distribution of tracer particles for PIV measurements in air, using propylene glycol/water solution // *Experimental thermal and fluid science*, 2017, no. 81, pp. 1 - 8.
16. Cao L., Zhang B., Song X., XU C., Wang S. Reconstruction method of three-dimensional particle field based on focused light field imaging // *Beijing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao*, 2017, vol. 42, no. 11, pp. 2322 - 2330.
17. Margaris K.N., Black R.A., Nepiyushchikh Z., Zawieja D.C., Moore J. Microparticle image velocimetry approach to flow measurements in isolated contracting lymphatic vessels // *Journal of biomedical optics*, 2010, vol. 99, no. 1-2, pp. 325 – 332.
18. Someya S., Ochi D., LI Y., Tominaga K., Ishii K., Okamoto K. Combined two-dimensional velocity and temperature measurements using a high-speed camera and luminescent particles // *Applied physics b: lasers and optics*, 2016, vol. 21, no. 2, pp. 025002.
19. Melling A. Tracer particles and seeding for particle image velocimetry // *Measurement science and technology*, 1997, vol. 8, no. 12, pp. 1406 – 1416.
20. Наумов И.В., Кабардин И.К., Окулов В.Л., Микельсон Р.Ф. Комплексная оптико-лазерная диагностика вихревой структуры течения за моделью ротора ветрогенератора // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. 2013. № 1 (12). С. 289 - 295.