

УДК 536.46

## «ТРАССЕРНАЯ» ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ДВИЖЕНИЯ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ГАЗЫ

**Жданова А.О., Забелин М.В., Няшина Г.С., Стрижак П.А.**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, e-mail: zhdanovaao@tpu.ru*

С использованием высокоскоростной бесконтактной измерительной системы проведено экспериментальное исследование поведения потока капель распыленной воды при движении через высокотемпературные газы. Представлены схема экспериментального стенда, методика проведения экспериментов и результаты обработки полученных данных. При обработке экспериментальных данных использовался бесконтактный метод цифровой «трассерной» визуализации PIV (Particle Image Velocimetry). Приведены видеogramма паракапельного потока воды (с примесью «трассирующих» частиц нанопорошка диоксида титана), проходящего через высокотемпературные газы, двумерные поля скоростей, гистограммы, показывающие распределение исследуемых значений, и графики компонент скорости капель распыленной жидкости. В заключении сделаны выводы о возможностях используемого метода PIV, приведены его достоинства и недостатки, а также преимущества данного метода при исследовании потоков жидкости и газов

**Ключевые слова:** визуализация, распыленная вода, капли

## «TRACER» VISUALIZATION OF EXPERIMENTS TO INVESTIGATION THE MOVEMENT SPRAYED WATER THROUGH HIGH-TEMPERATURE GASES

**Zhdanova A.O., Zabelin M.V., Nyashina G.S., Strizhak P.A.**

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: zhdanovaao@tpu.ru*

The experimental researching behavior of droplets flow of spray liquid at movement through the high-temperature gases is conducted using the high-speed no-contact measuring system. The scheme of test-bed, technic of experimentation and results of findings processing are proposed. The no-contact method digital «tracer» visualization PIV (Particle Image Velocimetry) is used for the processing of experimental data. Video frames of vapor-drop water flow (with a «tracer» particles of titanium dioxide nanopowder), moving through the high-temperature gases, two-dimensional velocities fields and histograms, displaying the distribution of investigate values are presented, graphics of sprayed liquid droplets velocities component. The conclusion shows the implications of the possibilities of the method PIV, its advantages and disadvantages, and advantages of this method at investigation of liquid and gas flow are proposed.

**Keywords:** visualization, sprayed water, drops

В последние годы в связи с развитием капельных и полидисперсных технологий пожаротушения достаточно активно (например, [1, 2, 10]) исследуются процессы формирования, движения и распада потоков распыленной жидкости (особое внимание уделяется поведению капель в потоке, скоростям и траекториям их движения).

Метод цифровой «трассерной» визуализации PIV (Particle Image Velocimetry) [6–9] относится к классу бесконтактных оптических методов измерения скоростей капель в паракапельных потоках. Одним из основных элементов метода PIV является обработка полученных в эксперименте изображений. Развитие цифровой и компьютерной техники во многом сократило время обработки и регистрации изображений, что еще больше укрепило позиции PIV среди бесконтактных методов.

К достоинствам метода PIV можно отнести широкий диапазон измеряемых скоростей и отсутствие возмущающего влияния на поток. Среди недостатков следует выде-

лить то, что «трассеры» не всегда следуют за исследуемым потоком жидкости или газа.

Стандартный алгоритм цифровой обработки PIV-изображений для определения смещений частиц включает следующие процедуры:

- 1) разбиение каждой пары изображений на элементарные равные расчетные области;
- 2) расчет кросскорреляционной функции для каждой области;
- 3) вычисление максимума корреляционной функции;
- 4) попиксельная интерполяция максимума корреляционной функции.

**Цель настоящей работы** – экспериментальное исследование движения распыленной воды через высокотемпературные газы с использованием бесконтактного оптического метода «трассерной» визуализации PIV.

### **Экспериментальный стенд и методы исследований**

При проведении эксперимента использовался стенд (аналогичен используемому в [1, 2]), основными

элементами которого являются (рис. 1): кросскорреляционная видеокамера (формат изображения – 2048×2048 пикселей, кадровая частота – 1,5 Гц, минимальная задержка между последовательными кадрами – 5 мкс), двойной импульсный твердотельный лазер (с активной сферой «алюмо-иттриевый гранат» и добавками неодима, длина волны – 532 нм, минимальная энергия в импульсе – 70 мДж, максимальная длительность импульса – 12 нс, частота повторений – 15 Гц), синхронизирующий процессор (максимальная дискретизация сигналов – 10 нс, поддержка режимов внешнего и внутреннего запуска).

В качестве рабочей жидкости применялась вода со специальными включениями – «трассерами» из

диоксида титана (их выбор обусловлен тем, что они не растворяются в воде [4]). Жидкость заливалась в емкость 7. Для генерации капель жидкости с заданными начальными размерами, концентрацией и скоростью использовался распылитель 9.

Измерительной областью видеокладов камеры 3 считалась плоскость «светового ножа» 6 (рис. 1). Положение камеры 3 и лазера 2 выбиралось таким образом, чтобы оптическая ось камеры и плоскость светового «ножа» лазера пересекались под углом 90 градусов. Ширина видеоклада соответствует диаметру канала 13. Продольный и поперечный размеры видеоклада равны. Толщина «ножа» лазера составляет 0,01 м.

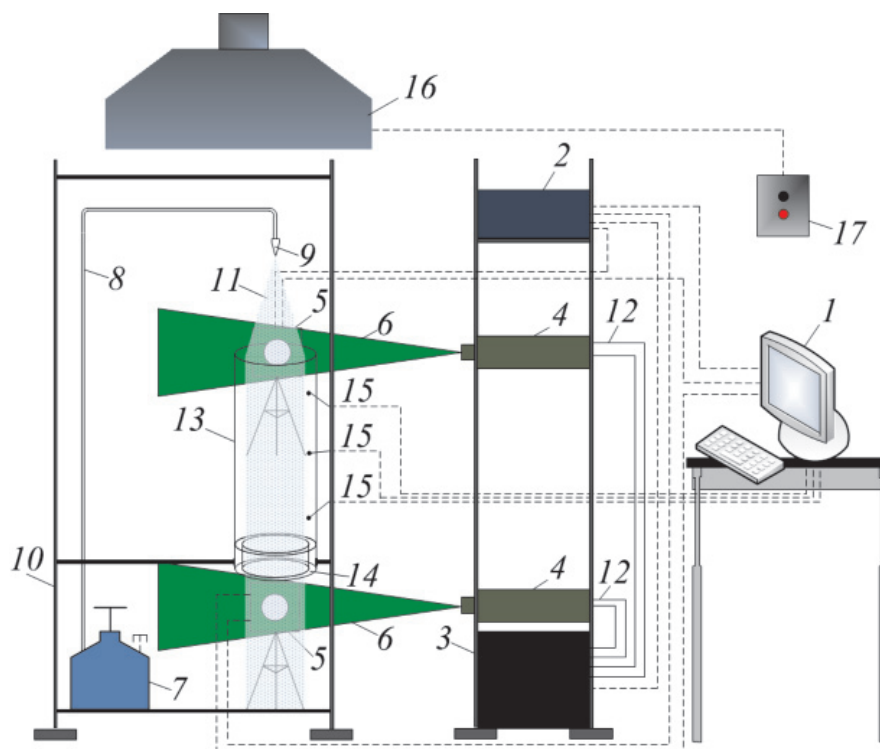


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 – ПК; 2 – синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 3 – генератор лазерного излучения; 4 – двойной твердотельный импульсный лазер; 5 – кросскорреляционная камера; 6 – световой «нож»; 7 – ёмкость с рабочей жидкостью; 8 – канал подачи рабочей жидкости; 9 – распылитель (дозатор); 10 – стойка; 11 – капля рабочей жидкости; 12 – канал движения охлаждающей жидкости лазера; 13 – цилиндр из жаростойкого светопрозрачного материала; 14 – полый цилиндр, в межстеночное пространство которого залита горючая жидкость; 15 – термпары; 16 – вытяжная система; 17 – пульт включения/отключения вытяжной системы

Скорости капель жидкости определялись по перемещениям «трассеров», входящих в их объем, с применением метода PIV. «Трассирующие» частицы в измерительной плоскости потока многократно освещались лазером. Образы частиц регистрировались на кросскорреляционную камеру. Последующая обработка изображений позволяла рассчитать смещение частиц за время между вспышками источника света и построить «двухкомпонентные» поля скоростей «трассеров». Использован кросскорреляционный алгоритм, основой которого является метод быстрого преобразования Фурье с добавлением условий выполнения «корреляционной теоремы». Систематические погрешности изме-

рения скоростей «трассеров» согласно не превышали 2%. Случайные погрешности вычисления скоростей «трассеров» достигали 3%.

### Результаты экспериментов и методы их обработки

В соответствии с методиками PIV [6–9] под визуализацией понимается набор приемов и методов представления числовых данных в удобном и понятном для вычислений и кросскорреляционной скоростной регистрации виде.

В PIV доступны следующие способы визуализации [6–9]:

- растровые изображения;
- двумерные поля скоростей;
- гистограммы;
- графики;
- таблицы данных.

Рассмотрим каждый из них подробнее.

При съемке процесса распыления капель жидкости с помощью кросскорреляционной камеры в экспериментах был получен ряд видеокадров в виде растровых изображений (наиболее типичные представлены на рис. 2). Растровое изображение в данном случае служит начальным материалом для дальнейшей работы с полученными данными. Метод PIV при работе с растровыми изображениями позволяет проводить операции вычитания, сложения, умножения и деления над интенсивностью самих изображений, а также использовать «шумоподавляющие» фильтры [6–9].

В потоках жидкостей и газов часто интересны для представления двумерные поля скоростей. На рис. 3 приведены полученные в результате обработки группы растровых изображений двумерные поля скорости

в виде векторных полей. При обработке полученных данных можно настраивать количество отображаемых векторов и их внешний вид, а также использовать арифметические операции над векторами.



Рис. 2. Видеограмма капель распыленной жидкости

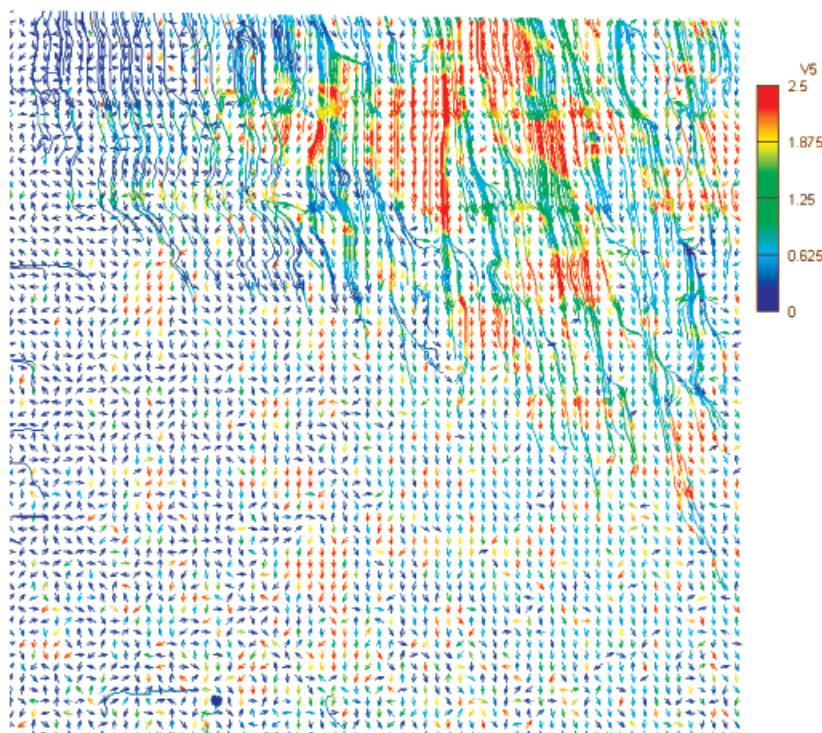


Рис. 3. Двумерное поле скоростей капель распыленной жидкости

Любая скалярная величина, содержащаяся в двумерном поле данных, может быть отображена также в виде скалярного поля. При необходимости представления анализа «ансамбля данных» [6–9] можно использо-

вать гистограммы, показывающие распределение исследуемых значений в виде столбиков. На рис. 4 представлена гистограмма распределения компонент скорости  $V_x$  (синий) и  $V_y$  (красный).

При необходимости исследования компонент скорости отдельно используют алгоритм построения графиков [6–9]. Один из таких графиков для компоненты скорости  $V_x$  представлен на рис. 5.

Также данные «трассерной» визуализации кросскорреляционными камерами можно представить с использованием методик PIV [6–9] в виде таблиц с массивами соот-

ветствующих значений. Широкий функционал метода PIV кроме представленных графических иллюстраций позволяет установить и мгновенное положение границы фазового перехода «жидкость – высокотемпературный газ» [3, 5], что до настоящего времени представлялось весьма затруднительным и практически не реализуемым вследствие интенсивного парообразования.

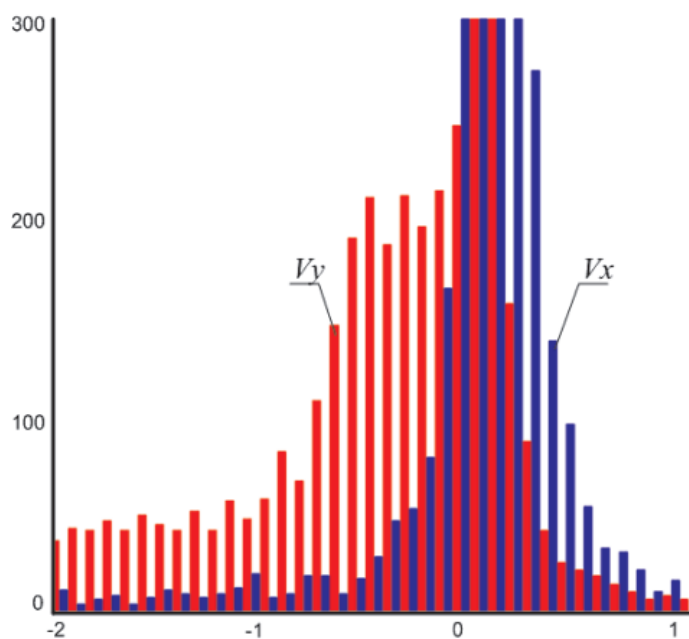


Рис. 4. Гистограмма распределения компонент скоростей  $V_x$  (синий) и  $V_y$  (красный) капель распыленной жидкости

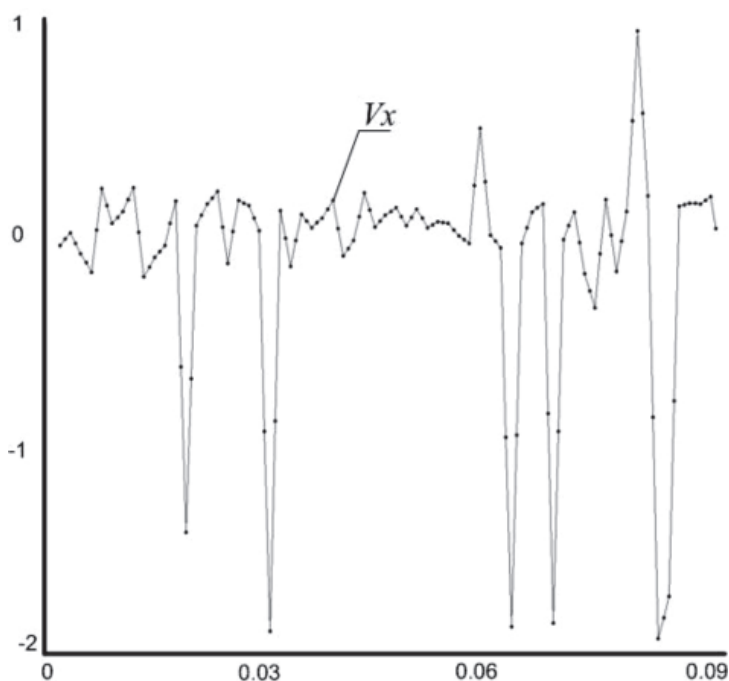


Рис. 5. Распределение компоненты скорости  $V_x$  капель распыленной жидкости



### Заключение

Таким образом, на примере проведения эксперимента по исследованию движения каплей распыленной жидкости были рассмотрены и описаны методы обработки и отображения данных в бесконтактном методе «трассерной» визуализации PIV. Основными преимуществами метода являются: отсутствие влияния на газовый или жидкостный исследуемый поток; возможность измерения мгновенных распределений скоростей; широкий диапазон измеряемых скоростей – от нуля до сверхзвуковых, а также большое количество способов обработки и представления данных.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 14-08-00057).*

### Список литературы

1. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Влияние начальных параметров распыленной воды на характеристики ее движения через встречный поток высокотемпературных газов // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 7. – С. 15–23.
2. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Особенности испарения двух капель воды, движущихся последовательно через высокотемпературные продукты сгорания // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21, № 2. – С. 269–272.
3. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Анализ влияния начальной температуры распыленной воды на интегральные характеристики ее испарения при движении через зону «горячих» газов // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87, № 2. – С. 436–444.
4. Ильин А.П. Особенности физико-химических свойств нанопорошков и наноматериалов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – 196 с.
5. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Движение совокупности капель мелкодисперсной жидкости во встречном потоке высокотемпературных газов // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40, № 12. – С. 11–18.
6. Damaschke N., Nobach H., Tropea C. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics // Experiments in Fluids. – 2002. – Vol. 32, № 2. – P. 143–152
7. Foucaut J.M., Stanislas M. Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields // Measurement Science and Technology. – 2002. – Vol. 13. – P. 1058–1071.
8. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. Particle image velocimetry. – Berlin: Springer Verlag, 1998. – 253 p.
9. Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry // Measurement Science and Technology. – 1997. – Vol. 8. – P. 1379–1392.
10. Xiao X.K., On the behavior of flame expansion in pool fire extinguishment with steam jet // Journal of Fire Sciences. – 2011. – Vol. 29, № 4. – P. 339–360.

### References

1. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Zhur. Tekhn. Fiz., 2014, Vol. 84, no 7, pp. 15–23.
2. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Teplofiz. i Aeromek., 2014, Vol. 21, no 2, pp. 269–272.
3. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Inz.-Fizic. Zhur., 2014, Vol. 87, no 2, pp. 436–444.
4. Il'in A.P. *Osobennosti fiziko-khimicheskikh svoystv nanoporoshkov i nanomaterialov* [Features of physical and chemical properties of nanopowders and nanomaterials]. Tomsk, TPU Publ., 2012. 196 p.
5. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Pis'ma v Zhur. Tekhn. Fiz., 2014, Vol. 40, no 12, pp. 11–18.
6. Damaschke N., Nobach H., Tropea C. Experm. in Fl., 2002, Vol. 32, no 2, pp. 143–152
7. Foucaut J.M., Stanislas M. Meas. Scien. and Techn., 2002, Vol. 13, pp. 1058–1071.
8. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. [Particle image velocimetry]. Berlin, Springer Verlag, 1998. 253 p.
9. Westerweel J. Meas. Scien. and Techn., 1997, Vol. 8, pp. 1379–1392.
10. X.K. Xiao, Jour. of Fire Scien., 2011, Vol. 29, no 4, pp. 339–360.

### Рецензенты:

Мамонтов Г.Я., д.ф.-м.н., профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск;  
 Шидловский С.В., д.т.н., профессор, Национальный исследовательский, Томский государственный университет, г. Томск.  
 Работа поступила в редакцию 23.07.2014