

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ ПАРОКАПЕЛЬНЫХ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Дмитриенко М.А.<sup>1</sup>, Жданова А.О.<sup>1</sup>, Забелин М.В.<sup>1</sup>, Стрижак П.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, e-mail: [zhdanovaao@tpu.ru](mailto:zhdanovaao@tpu.ru)

В работе представлены схема, методика проведения и результаты экспериментов по исследованию процессов, протекающих при вхождении распыленной воды в поток высокотемпературных продуктов сгорания. Для регистрации и обработки видеogramm в экспериментах использовано высокоточное диагностическое оборудование, работающее на базе методов цифровой трассерной визуализации, в частности PIV (Particle Image Velocimetry). Приведены видеogramмы, поля и гистограммы скоростей для момента входа парокapельной смеси - потока распыленной жидкости (воды с «трассирующими» частицам нанопорошка диоксида титана) в высокотемпературный газовый поток (продукты сгорания). Показаны характерные для рассматриваемого процесса смешения эффекты разворота траектории потока капель. Установлено существенное влияние скорости восходящих продуктов сгорания, а также размеров отдельных капель распыленной жидкости в потоке на степень уноса последних.

Ключевые слова: распыленная вода, капели, продукты сгорания, пламя, газовые смеси.

## RESEARCH OF THE MIXTURE PROCESSES VAPOR-DROPLET AND HIGH-TEMPERATURE GAS MIXTURES

Dmitrienko M.A.<sup>1</sup>, Zhdanova A.O.<sup>1</sup>, Zabelin M.V.<sup>1</sup>, Strizhak P.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia, e-mail: [zhdanovaao@tpu.ru](mailto:zhdanovaao@tpu.ru)

The diagram, technique and results of series experiments to investigation of processes on the entering of sprayed water into the high-temperature combustion products flow are proposed. Modern high-precision diagnostic equipment operating on the basis of the method digital “tracer” visualization, in particular, PIV (Particle Image Velocimetry) is used for the recording and processing of video frames in experiments. Video frames, histograms and the velocities fields on the entering of vapor-drop mixture - spray liquid flow (water with a “tracer” particles of titanium dioxide nanopowder) on the high-temperature gas flow (combustion products) are presented. Effects of turning the trajectory droplets flow, typical for the considered process of mixing are shown. Significant effect of the velocity rising combustion products and sizes of individual droplets of sprayed water flow on the degree of the latter’s ash is established.

Keywords: sprayed water, drops, combustion products, flame, temperature, gas mixtures.

### Введение

Распыленная специальным образом вода (например, «водяной туман», «водяная завеса», «тонкораспыленная вода») довольно широко используется в последние годы для локализации пламени и ликвидации возгораний [5; 6; 8]. Выполненные экспериментальные и теоретические исследования показывают возможность существенного повышения эффективности тушения пожаров с использованием распыленной воды. Тем не менее, так как процессы смешения газовых и парокapельных сред характеризуются [1; 10] достаточно сложными механизмами тепло- и массопереноса и фазовыми превращениями, то нередко возникают сложности разработки соответствующих технологий тушения.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование процесса смешения парокapельного потока распыленной воды и продуктов сгорания на входе в зону пламени с

использованием современной измерительной кросскорреляционной регистрирующей видеосистемы.

### **Экспериментальная установка и методы исследований**

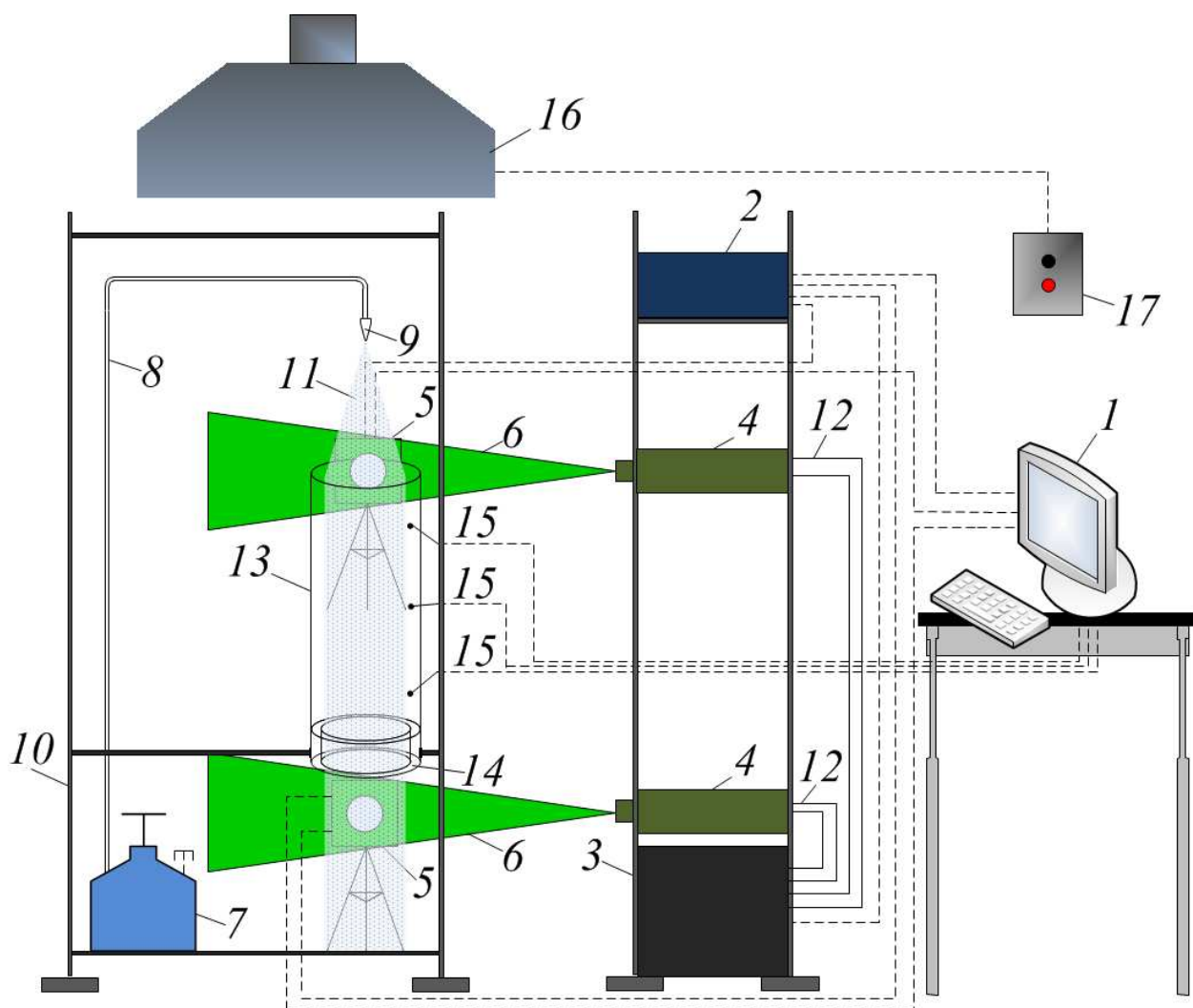
При проведении эксперимента использовался стенд (аналогичен используемым в [2; 3]), основными элементами которого являются (рис. 1): кросскорреляционная видеокамера (формат изображения – 2048x2048 пикселей, кадровая частота – 1.5 Гц, минимальная задержка между двумя последовательными кадрами – 5 мкс), 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 (для повышения контрастности видеограмм экспериментов) – «трассерами», представляющими примесь (0.5% по массе) нанопорошка диоксида титана (выбор  $TiO_2$  обусловлен его нерастворимостью в воде [4]).

Вода заливалась в емкость 7, в которой устанавливалась хромель-копелевая термопара для контроля ее начальной температуры  $T_w$ . Для снижения расхождения условий проведения экспериментов и обеспечения постоянства состава рабочей жидкости и продуктов сгорания серии проводились за короткие интервалы времени.

Для генерации капель жидкости с заданными начальными размерами, концентрацией и скоростью использовался распылитель 9.

Для формирования потока высокотемпературных газов в экспериментальном стенде использовался цилиндрический канал 13 (высота 1 м, диаметр 0.3 м). В основании канала 13 устанавливался полый цилиндр 14 (высота 0.1 м, внутренний и внешний диаметры – 0.26 и 0.3 м соответственно), в межстеночное пространство которого заливался керосин (около 250 мл) и поджигался перед проведением опытов. По истечении 5 минут в канале 13 формировался поток продуктов сгорания с температурой  $1070 \pm 30$  К. Температура газов в канале 13 контролировалась хромель-алюмелевыми (диапазон измеряемых температур –  $273 \div 1373$  К, погрешность измерения  $\pm 3.3$  К) термопарами 15 (проводились измерения в трех точках по высоте канала – 0.15, 0.5, 0.85 м на оси его симметрии).



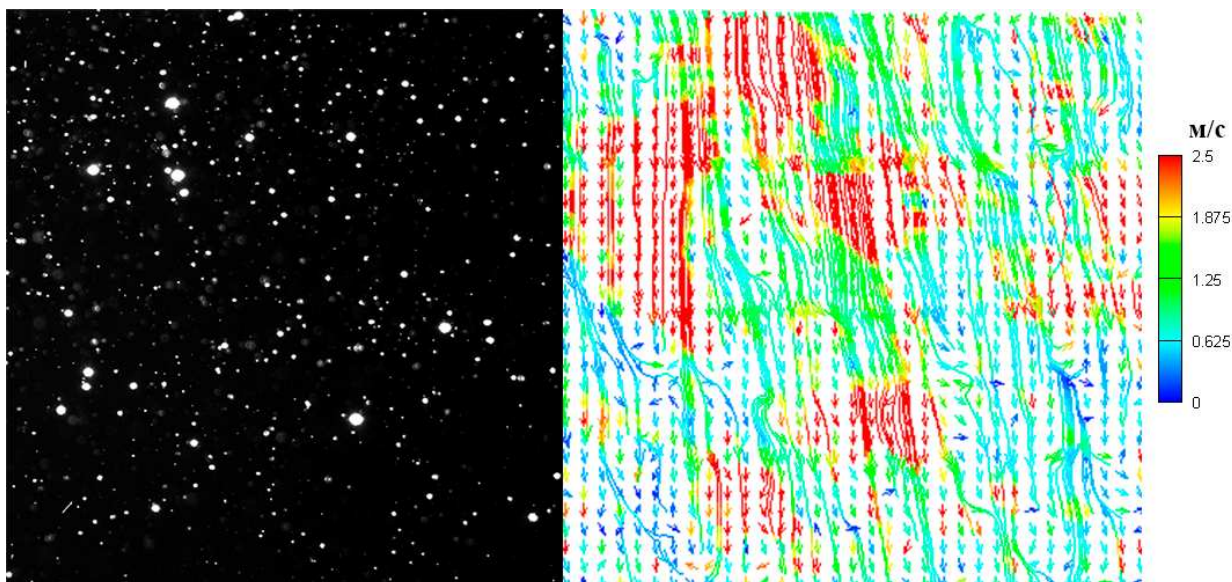
**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – ПК; 2 – синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 3 – генератор лазерного излучения; 4 – двойной твердотельный импульсный лазер; 5 – кросскорреляционная камера; 6 – световой «нож»; 7 – ёмкость с рабочей жидкостью; 8 – канал подачи рабочей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

Измерительной областью видеокадров 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 (точка их пересечения находилась в регистрационной области видеокадра). Ширина видеокадра соответствует диаметру канала 13. Продольный и поперечный размеры видеокадра равны. Толщина «ножа» лазера составляет 0.01 м.

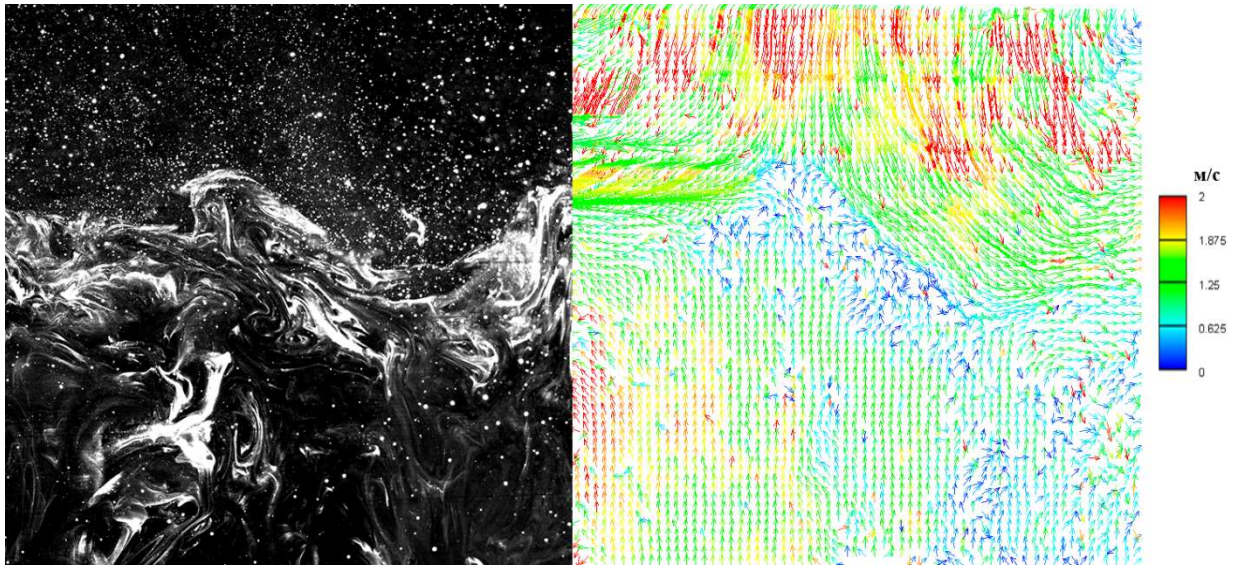
Скорости капель жидкости определялись по перемещениям «трассеров», входящих в их объем, с применением метода PIV [7; 9]. «Трассирующие» частицы в измерительной плоскости потока многократно освещались лазером. Образы частиц регистрировались на кросскорреляционную камеру. Последующая обработка изображений 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» [3; 4; 9]. Важно отметить, что значения скоростей капель  $U_m$  представляют скорости, осредненные за время между вспышками лазера согласно [7; 9]. Систематические погрешности измерения скоростей «трассеров» согласно [2–4; 7; 9] не превышали 2%. Случайные погрешности вычисления скоростей «трассеров» достигали 3%.

### Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены полученные в результате серии экспериментов видеокадры на входе в цилиндрический канал 13 для случая заполнения последнего высокотемпературными продуктами сгорания и условий без пламени. На рис. 2б можно увидеть непосредственно процесс смешения высокотемпературных газов с водяным парокапельным потоком. Следует отметить интенсивное формирование вихревых структур на рис. 2б, что обусловлено как противоположными направлениями движения исследуемых потоков, так и значительным вдувом паров с поверхности капель.



*a*



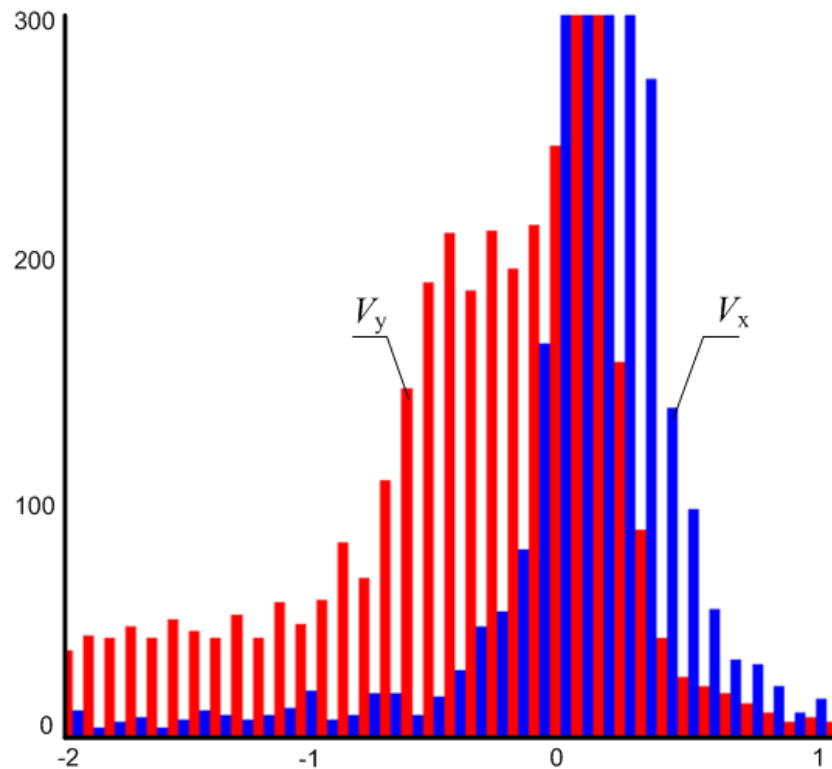
б

**Рис. 2.** Видеogramмы и поля скоростей капель распыленной жидкости без пламени (а) и на входе в зону пламени (б).

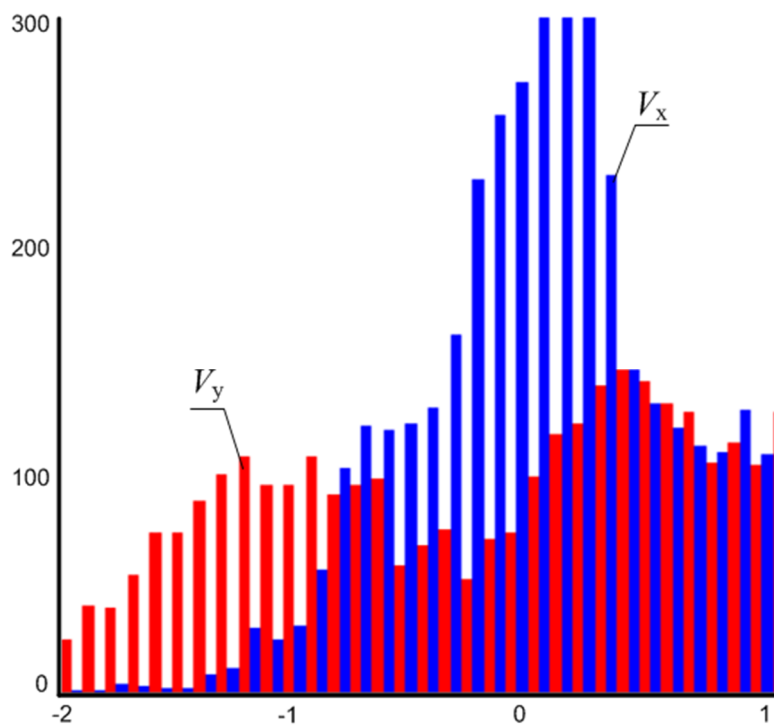
При анализе видеogramм экспериментов (в частности, рис. 2) можно сделать вывод о том, что без пламени капли распыленной жидкости довольно равномерно проходят через канал 13, а при взаимодействии с противоположным потоком высокотемпературных газов сильно меняют траекторию (хорошо виден унос капель газами). Установлено, что на степень уноса капель существенно влияют и скорость, и их начальные размеры. Так, при размерах  $R = 0.01 \div 0.15$  мм «критическими» (достаточными для «торможения» капель) скоростями потока газов являются  $\vartheta_g^{\text{lim}} = 0.2 \div 0.3$  м/с. При росте начальных скоростей капель до 2 м/с возможно сохранение их первоначального вектора движения при идентичных размерах, но довольно не продолжительное (вследствие прогрева и испарения). Так, например, капли с размерами  $R < 0.01$  мм полностью испаряются на входе в зону пламени вне зависимости от их скоростей и скорости потока газов. Выявлено, что поток высокотемпературных газов способствует «торможению» впереди идущих капель, их развороту и последующему слиянию с идущими навстречу каплями жидкости.

На рис. 3 приведены гистограммы компонент скорости капель воды по оси  $x$  ( $V_x$ ) и по оси  $y$  ( $V_y$ ), построенные по данным полей скорости для двух рассмотренных выше случаев (ось  $y$  характеризует направление движения капель, а ось  $x$  – поперечное этому движению направление). Изначально значения скорости по оси  $y$   $\vartheta_d < 0$  м/с, так как поток капель движется вниз. Увеличение и изменение знака значений скоростей на  $\vartheta_d > 0$  м/с соответствуют изменению направления их движения на противоположное, то есть совпадающее с вектором скорости продуктов сгорания в канале 13. На приведенных

гистограммах видно, что при смешении потоков количество векторов  $V_y$  и их длина значительно уменьшается, а  $V_x$  увеличивается, что характеризует завихрение парок капельного потока (происходит существенное «торможение» капель).



*a*



*б*

**Рис. 3.** Гистограмма распределения компонент скоростей  $V_x$  (синий) и  $V_y$  (красный) капель распыленной жидкости без пламени (*a*) и на входе в зону пламени (*б*).

В то же время следует отметить, что при размерах капель  $R > 0.25$  мм и их скоростях  $U_d > 2$  м/с они продолжают движение через высокотемпературный поток с сохранением начального вектора перемещения. Как следствие, можно сделать вывод о том, что даже для полидисперсного капельного потока возможно определение необходимых и достаточных начальных параметров, при которых обеспечивается требуемый состав газопарокапельных смесей и траектории движения компонентов.

### **Заключение**

Экспериментальные исследования, проведенные с использованием высокоскоростной измерительной PIV-системы, позволяют проанализировать основные закономерности смешения газовых и парокапельных потоков (продуктов сгорания, капель воды и водяных паров) в условиях высоких температур.

Установлено определяющее влияние скоростей движения продуктов сгорания на степень уноса последних высокотемпературными газами, проиллюстрированы завихрения газопарокапельных потоков и изменения скоростей капель.

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

### **Список литературы**

1. Андреев Г.Г. Тепломассоперенос при взаимодействии диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания // Бутлеровские сообщения. – 2012. – Т. 31, № 8. – С. 86-94.
2. 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.
3. 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.
4. Ильин А.П. Особенности физико-химических свойств нанопорошков и наноматериалов. – Томск : Изд-во ТПУ, 2012. – 196 с.
5. Корольченко Д.А., Громовой В.Ю., Ворогушин О.О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность. - 2011. - Т. 20, № 9. - С. 54-57.
6. Саламов А.А. Современная система пожаротушения «водяной туман» высокого давления // Энергетик. – 2012. – № 3. – С. 16-18.

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. Karpov A.I. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles // *Fire safety science: proceeding of eight international symposium*. – 2005. - Vol. 27. – P. 753-764.
9. Keane R.D., Adrian R.J. Theory of cross-correlation analysis of PIV images // *Applied Scientific Research*. - 1992. - Vol. 49. - P. 191-215.
10. Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Heat and Mass Transfer in the Process of Movement of Water Drops in a High-temperature Gas Medium // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. - 2013. - Vol. 86, № 1. - P. 62-68.

**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.