

03

## Влияние начальных параметров распыленной воды на характеристики ее движения через встречный поток высокотемпературных газов

© Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050 Томск, Россия  
e-mail: pavelspa@tpu.ru

(Поступило в Редакцию 1 ноября 2013 г.)

С использованием оптических методов диагностики двухфазных газо- и парожидкостных потоков проведено экспериментальное исследование макроскопических закономерностей движения распыленной воды через встречный поток высокотемпературных газов. Установлено влияние начальной температуры, концентрации типичных примесей и дисперсности воды на компонентный состав формирующейся газопарокапельной смеси. Выполнено сравнение интегральных характеристик испарения одиночных капель с начальными размерами (условными характерными радиусами) 3–5 мм и потока распыленной жидкости с каплями размерами менее 0.5 мм при движении через высокотемпературную газовую среду.

### Введение

Двухфазные газопарокапельные смеси рассматриваются в качестве перспективных газопаровых теплоносителей [1,2], специальных высокотемпературных сред для очистки и обработки поверхностей различных конструкционных материалов [3], размораживания сыпучих составов [4], а также ликвидации очагов возгораний [5,6]. Технологии [1–6] не получили широкого распространения, так как при их реализации предъявляются довольно жесткие требования к компонентным составам используемых газопарокапельных смесей. В условиях нестационарного теплообмена и при смене режимов течения (ламинарный, переходный и особенно турбулентный) затруднительно [7–12] поддерживать этот состав в допустимых диапазонах [1–6]. Особенную сложность представляют процессы формирования многокомпонентных двухфазных смесей при встречном движении газов и парожидкостных сред. Целесообразно исследовать влияние начальных параметров парожидкостных и газовых сред на компонентный состав формирующихся газопарокапельных смесей [1–6].

Установлено [13,14] влияние начальной температуры, компонентного состава и теплофизических характеристик газов (рассматривались типичные продукты сгорания) на интегральные характеристики движения через них водяных парокапельных смесей. Заключение [13,14] верифицированы результатами экспериментальных исследований [15]. Анализ теоретических положений и выводов [13–15] показывает, что определяющую роль при формировании газопарокапельных смесей могут играть и начальные параметры парожидкостной среды, в частности, температура, дисперсность, содержание различных примесей. Учитывая особенности испарения в потоке высокотемпературных газов [13–15] распыленной жидкости и одиночных крупных „монолитных“ капель с характерными размерами (условными

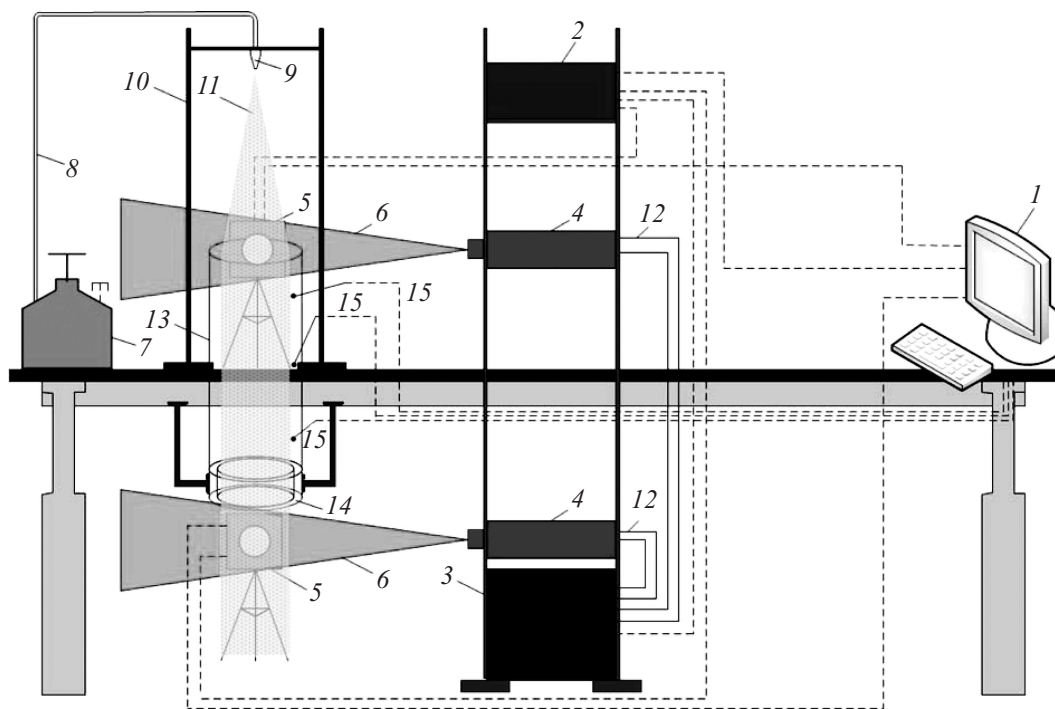
радиусами), например от 3 до 5 мм, целесообразны экспериментальные исследования влияния выделенных начальных параметров парожидкостной среды на характеристики фазовых превращений для систем „одиночная капля–высокотемпературные газы“ и „поток распыленной жидкости–высокотемпературные газы“.

Цель работы — экспериментальное исследование макроскопических закономерностей движения распыленной воды через встречный поток высокотемпературных газов при различных значениях начальной температуры, концентрации типичных примесей и дисперсности жидкости.

### Экспериментальная установка и методы исследований

При экспериментальных исследованиях использовалась установка, схема которой приведена на рис. 1. Основными элементами установки являются: кросс-корреляционная видеокамера (формат изображения 2048 × 2048 pix, кадровая частота 1.5 Hz, минимальная задержка между двумя последовательными кадрами 5 μs), двойной импульсный твердотельный лазер, активная среда YAG:Nd, длина волны 532 nm, минимальная энергия в импульсе 70 mJ, максимальная длительность импульса (12 ns, частота повторений 15 Hz), синхронизирующий процессор (максимальная дискретизация сигналов 10 ns, поддержка режимов внешнего и внутреннего запуска).

В качестве рабочей жидкости применялась вода со специальными включениями — „трассерами“, представляющими примесь (0.5% по массе) нанопорошка диоксида титана. Последние вводились для повышения контрастности видеogramм, получаемых кросс-корреляционной камерой. Частицы TiO<sub>2</sub> выбраны в качестве „трассеров“, так как не растворяются в воде [16]. На-



**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 — емкость с рабочей жидкостью, 8 — рабочая жидкость, 9 — распылитель (дозатор), 10 — штатив, 11 — капли рабочей жидкости, 12 — канал движения охлаждающей жидкости лазера, 13 — цилиндр из жаростойкого светопрозрачного материала, 14 — полый цилиндр, во внутреннее пространство которого залита горячая жидкость, 15 — термопары.

чальная температура распыляемой воды  $T_w$  варьировалась в диапазоне от 293 до 323 К (в соответствии с практическими приложениями, например, [1–6]). Использовалась нагревательная камера [17]. Также в рабочую жидкость добавлялись наночастицы NaCl (относительная концентрация  $\gamma$  варьировала в диапазоне 0–10 wt.%) для исследования влияния типичных примесей солей на характеристики испарения воды.

В качестве интегральных параметров процессов движения капель распыленной жидкости через высокотемпературные газы приняты скорость перемещения, размеры (условные характерные радиусы) и концентрация капель жидкости в регистрационной области видеogramм.

Для каждого значения  $T_w$  и  $\gamma$  цикл опытов включал две серии по десять экспериментов. В первой серии экспериментов фиксировались видеокadres с газопарокапельной смесью на входе в цилиндрический канал 13 (высота 1 м, диаметр 0.2 м), заполненный высокотемпературными газами. Во второй серии регистрировались изображения этой смеси после прохождения высокотемпературной области. Аналогичные серии экспериментов выполнены для одиночных „монолитных“ капель воды с начальными размерами от 3 до 5 мм (вместо распылителя использовался дозатор [15]).

Для формирования потока газов со стабильными основными параметрами в цилиндрическом канале 13 (температура, скорость движения, компонентный со-

став) использовались продукты сгорания типичного жидкого топлива — керосина. Аналогично [15] жидкое горючее вещество заливалось в основание полового цилиндра 14 экспериментальной установки (рис. 1). Перед началом очередного опыта инициировалось его зажигание.

Каждая серия эксперимента включала несколько этапов:

в емкость 7 заливалась предварительно нагретая до заданной температуры  $T_w$  (с применением специализированной камеры [17]) рабочая жидкость (варьировал компонентный состав: NaCl — 0–10%, H<sub>2</sub>O — 89.5–99.5%, TiO<sub>2</sub> — 0.5%);

к выходу емкости 7 через канал 8 подключался распылитель 9, который настраивался в зависимости от необходимых параметров распыления жидкости;

распылитель 9 устанавливался на штативе 10 на 0.5 м выше верхней грани цилиндра 13 (указанное удаление обусловлено необходимостью защиты распылителя 9 от плавления при воздействии выходящих из цилиндрического канала 13 высокотемпературных газов);

высота фотоштатива кросскорреляционной камеры 5, а также высота установки лазера 4 выбирались таким образом, чтобы оптическая ось камеры и плоскость светового „ножа“ 6 лазера пересекались под углом 90° (точка их пересечения находилась в регистрационной области видеокadres);

проводились калибровка кросскорреляционной камеры 5 (с определением масштабного коэффициента на персональном компьютере (ПК) 1), а также настройка „перетяжки“ светового „ножа“ 6 лазера 4;

основание полого цилиндра 14 заполнялось типичным жидким горючим веществом (около 250 ml), зажигание которого инициировалось перед проведением опыта;

по истечении 5 min (время, необходимое для прогрева внутренней полости цилиндра 13 до  $1070 \pm 30$  K) на ПК 1 запускалось специализированное программное обеспечение (реализующее оптические методы диагностики „Particle Image Velocimetry“ (PIV) и „Interferometric Particle Imaging“ (IPI)), включался распылитель 9 и проводилась процедура регистрации видеogramм с газопарокапельной смесью;

по полученным в ходе съемки видеокадров вычислялись размеры капель и их относительная концентрация в потоке газов, строились поля скоростей „трассирующих“ частиц распыленной жидкости и определялись значения скоростей капель.

Серии экспериментов проводились за короткие интервалы времени с целью минимизации расхождений условий проведения опытов, а также обеспечения постоянства начальных параметров парокапельной и газовой сред.

По результатам обработки видеокадров с применением метода цифровой трассерной визуализации PIV [18–20] строились „двухкомпонентные“ поля скорости „трассеров“ и определялись скорости движения отдельных капель. Измерение мгновенного поля скорости в заданном сечении основано на регистрации перемещения „трассеров“, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени [18]. Размеры, плотность и массовая концентрация „трассирующих“ частиц  $TiO_2$  подбирались таким образом, чтобы эффекты, связанные с плавучестью частиц и другими факторами, были минимальны [16]. Установлено, что примесей  $TiO_2$  с концентрацией 0.5% в воде достаточно для видеорегистрации капель жидкости в проводимых опытах.

Измерительной областью видеокадров кросскорреляционной камеры считалась плоскость „светового ножа“ лазера (рис. 1). „Трассирующие“ частицы в измерительной плоскости потока многократно (до 100 раз в секунду) освещались. Образы частиц регистрировались на цифровую видеокамеру. Последующая обработка изображений позволяла рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить „двухкомпонентные“ поля скорости „трассеров“ [18]. Эти процедуры основаны на кросскорреляционном алгоритме, представляющем метод быстрого преобразования Фурье с добавлением условий выполнения „корреляционной теоремы“ [19].

При обработке видеogramм рассчитывался масштабный коэффициент  $S$ , который для исследуемых рабочих областей (на входе и выходе канала с высокотемпературными газами) составил  $0.043$  mm/pix. В ходе обработки

каждая видеogramма разбивалась на регистрационные области  $32 \times 32$  pix. Для каждой области рассчитывалась корреляционная функция. Максимум корреляционной функции соответствовал наиболее вероятному сдвигу частиц в регистрационной области [20]. Согласно основным положениям [20], считалось, что скорость потока в элементарной области неизменна и у всех частиц одинаковые перемещения (т.е. у корреляционной функции существует один наиболее ярко выделенный максимум на фоне возможных шумов).

Для вычисления максимума корреляционной функции и уменьшения числа случайных корреляций, связанных с эффектом „потери пары“, применялось наложенное „Top-hat“ окно [19]. Это позволило уменьшить вклад в корреляционную функцию „трассеров“, которые лежат близко к границам расчетной области видеокадра.

При известных временных задержках между вспышками лазера и наиболее вероятных перемещениях частиц (определенных по максимуму корреляционной функции) в регистрационных областях видеокадров определялись „мгновенные“ [18] скорости „трассеров“.

При вычислении скоростей „трассеров“ использованы процедуры фильтрации со специализированными весовыми функциями [19,20]: „No-DC“ (для удаления постоянной компоненты в сигнале) и „Low-pass“ (для увеличения ширины корреляционных пиков за счет отсекающей небольшой части низких и значительной части высоких частот из спектра корреляционной функции). Также выполнялась процедура отсева части полученных векторов „трассеров“ по критерию „сигнал/шум“ (функция „Peak Validation“) [19].

В потоке распыленной жидкости размеры капель изменялись в диапазоне  $0.05 \leq R_m \leq 0.37$  mm. При обработке видеogramм для оценки изменения интегральных характеристик испарения капель последние условно разделены по начальным размерам на несколько групп: 1 —  $0.05 \leq R_m < 0.08$  mm, 2 —  $0.08 \leq R_m < 0.16$  mm, 3 — при  $0.16 \leq R_m \leq 0.23$  mm, 4 — при  $0.23 < R_m \leq 0.3$  mm, 5 — при  $0.3 < R_m \leq 0.37$  mm. Начальные размеры одиночных „монокристаллических“ капель варьировали в диапазоне  $3 \leq R_m \leq 5$  mm.

Размеры капель в регистрационных областях видеogramм (до и после высокотемпературной газовой среды) определялись с использованием оптического метода IPI [20]. Поток капель в регистрационной области многократно освещался световым ножом 6. Наблюдалась интерференция между отраженным и преломленным каплями светом. Выполнялась процедура видеофиксации изображений с использованием кросскорреляционной камеры 5. По числу наблюдаемых на видеogramмах интерференционных полос определялись размеры капель в потоке газов [20]. Так как капли воды на видеogramмах представляли эллипсоиды, то с использованием метода IPI [20] вычислялись средние значения максимальных диаметров и характерные значения радиусов  $R_m$ .

Температура газов (продуктов сгорания)  $T_f$  в цилиндрическом канале 13 контролировалась хромель-копелевыми термопарами и составила  $1070 \pm 30$  К. Начальная температура воды  $T_w$  измерялась хромель-алюмелевыми термопарами. Использовалась методика термопарных измерений [21]. Систематические погрешности измерения температур  $T_f$  и  $T_w$  не превысили 2.5% [22], размеров капель — 1.5% [23], скоростей „трассеров“ — 2% [20].

## Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены типичные видеogramмы с изображениями газопарокапельной смеси на входе и выходе из канала 13, заполненного высокотемпературными газами. Также представлены „двухкомпонентные“ поля скоростей „трассирующих“ частиц (рис. 2).

С использованием оптических методов (PIV и IPI) диагностики двухфазных многокомпонентных газопарожидкостных потоков по видеogramмам экспериментов вычислялись значения скоростей движения  $u_m$ , размеров  $R_m$  и относительной концентрации  $\alpha_m$  капель жидкости в области высокотемпературных газов. В таблице приведены типичные результаты вычислений.

Установлено (таблица), что при движении распыленной жидкости через высокотемпературную газовую среду происходит существенное изменение компонентного состава газопарожидкостной смеси. Так, например, при  $\gamma = 10\%$  и  $T_w = 293$  К капли воды с начальными размерами  $R_m \leq 0.08$  мм полностью испаряются в высокотемпературной газовой области и, как следствие, на выходе из рабочего канала 13 (рис. 1) для этой группы выполняется условие  $\alpha_m \rightarrow 0$ . При  $0.08 < R_m \leq 0.16$  мм размеры капель

Средние значения интегральных параметров движения капель распыленной жидкости ( $\gamma = 10\%$ ,  $T_w = 293$  К) через канал с высокотемпературной газовой средой

Наименование параметра	№ группы	На входе в канал	На выходе из канала
$R_m, \text{mm}$	1	0.075	—
	2	0.131	0.076
	3	0.187	0.129
	4	0.246	0.188
	5	0.308	0.242
$\alpha_m, \%$	1	14.44	—
	2	31.33	12.88
	3	39.55	32.22
	4	15.77	48.00
	5	3.77	12.22
$u_m, \text{m/s}$	1	0.711	—
	2	0.724	0.134
	3	0.782	0.249
	4	0.849	0.377
	5	0.943	0.548

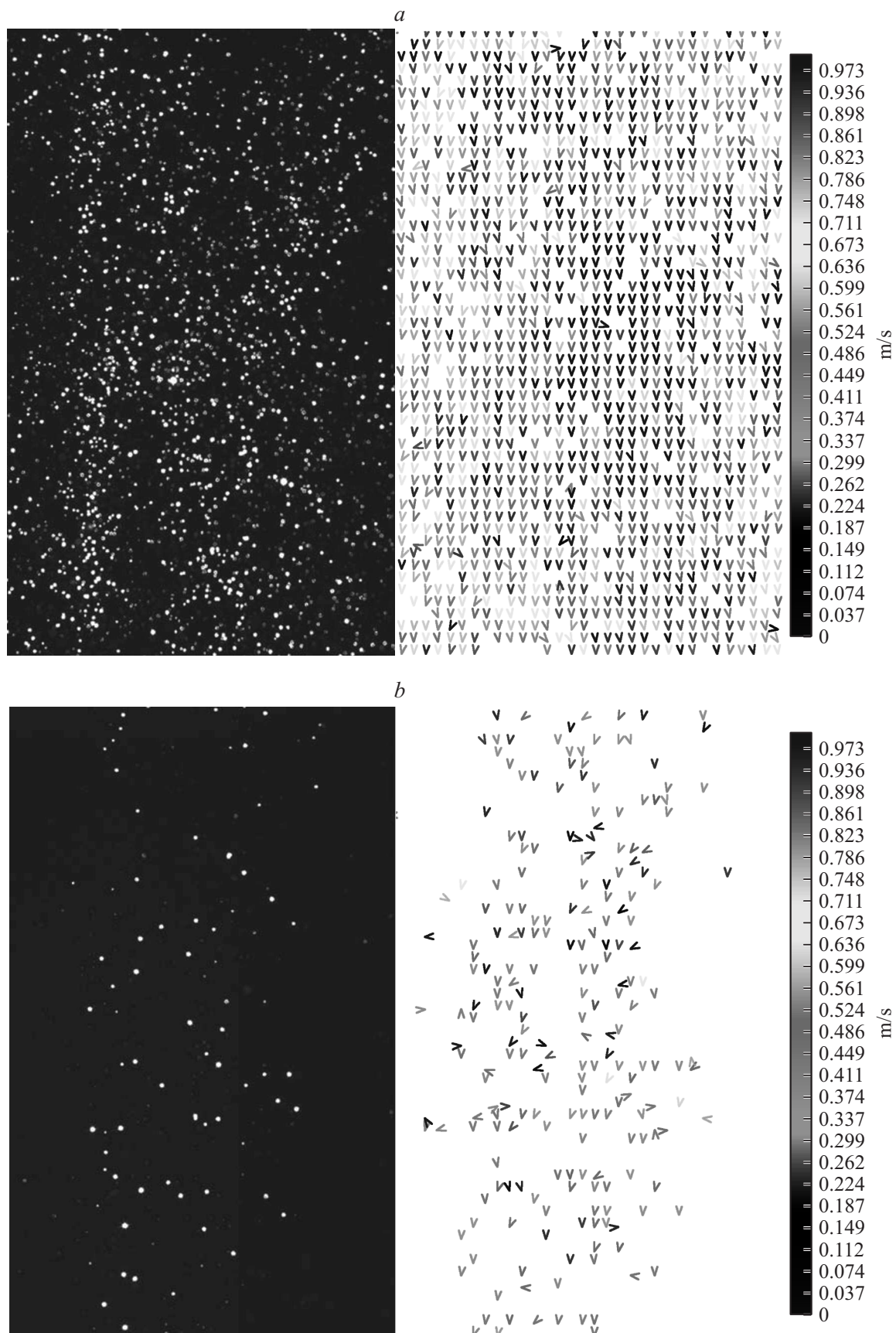
уменьшаются на 47%,  $0.16 < R_m \leq 0.23$  мм — на 30%,  $0.23 < R_m \leq 0.3$  мм — на 23%,  $0.3 < R_m \leq 0.37$  мм — менее чем на 17%.

При изменении дисперсности капель (за счет уменьшения  $R_m$  и особенно  $\alpha_m$ ) значительно снижаются скорости их движения  $u_m$  во встречном потоке высокотемпературных газов. Так, в таблице приведены значения  $u_m$  для выделенных условно (по начальным размерам) групп капель. Капли с характерными размерами  $R_m \leq 0.1$  мм (группы № 1 и № 2) значительно замедляют движение ( $u_m \rightarrow 0$ ). Для капель группы № 3 уменьшение  $u_m$  относительно начальных значений происходит на 65–70%, группы № 4 — на 55–60%, группы № 5 — на 39–42%. Полученные результаты можно объяснить как встречным движением высокотемпературных газов (рис. 3), так и существенным уменьшением (таблица) размеров (как следствие, значительной убылью массы) капель жидкости при испарении.

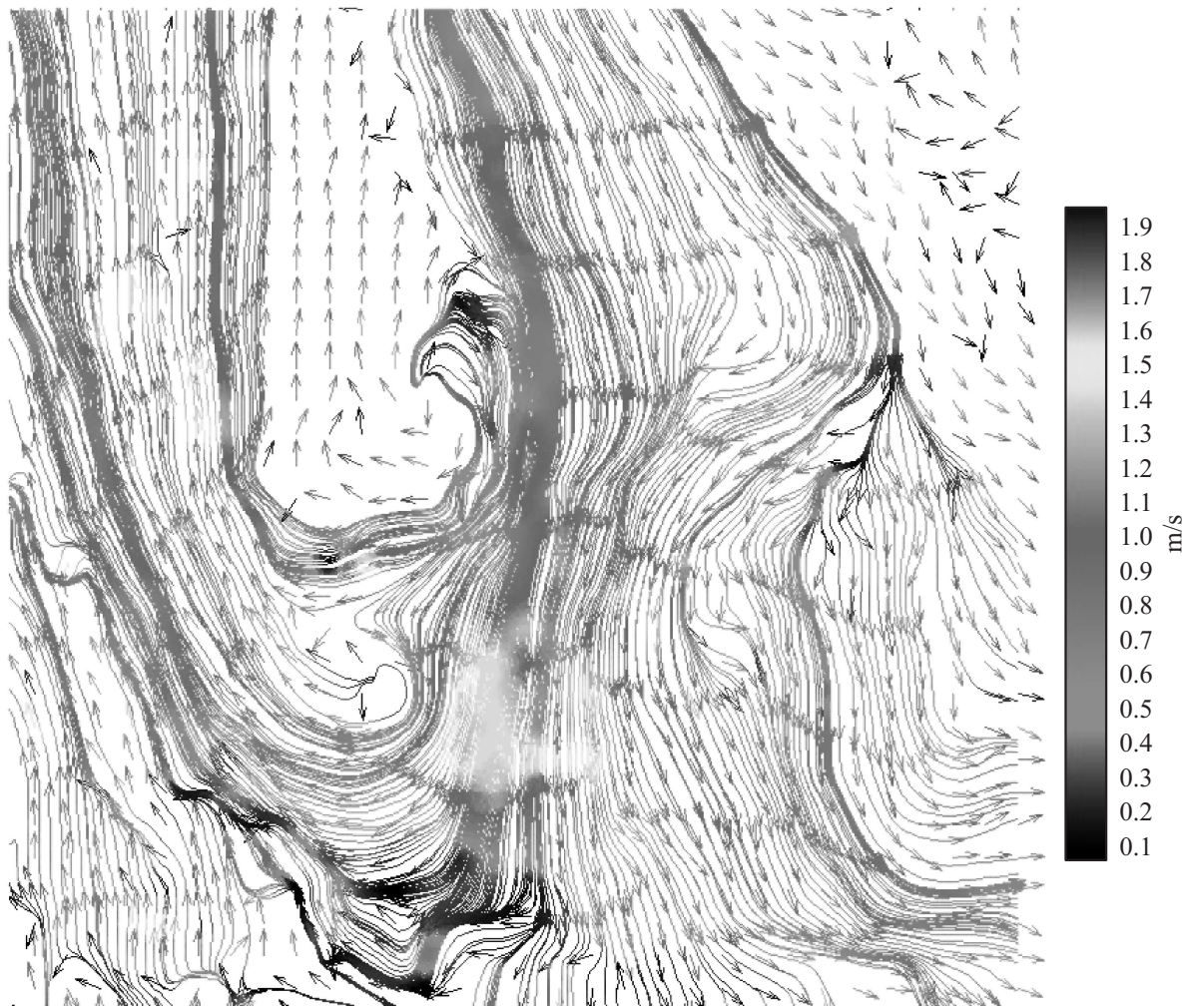
На рис. 3 представлены изолинии скоростей „трассирующих“ частиц на входе в рабочий канал с высокотемпературными газами. Можно выделить несколько контуров завихрений, характеризующих „торможение“ движения капель жидкости и изменение направления их перемещения на противоположное. Эти контуры соответствуют каплям с начальными размерами  $R_m \leq 0.08$  мм. При  $R_m > 0.08$  мм движение капель также замедляется. Но вокруг таких капель формируются лишь локальные контуры завихрений вследствие парообразования и уноса непосредственно „трассирующих“ частиц восходящими газами (рис. 3). За счет эндотермических фазовых превращений уменьшается температура газов в малой окрестности капель. Также снижаются скорости движения последних. Это достаточно хорошо видно на гистограмме скоростей, приведенной на рис. 4.

Показано (рис. 4), что из всего спектра векторов „трассеров“, соответствующих газам, водяным парам и каплям жидкости в типичной регистрационной области видеogramмы (на входе в канал 13) лишь для 20–30% скорости  $u_m$  достигают значений 0.5–1 м/с. Эти „трассеры“ соответствуют каплям с начальными размерами  $R_m > 0.08$  мм. Остальные „трассеры“ представляют частицы  $\text{TiO}_2$ , высвободившиеся при испарении малых ( $R_m < 0.08$  мм) капель и движущиеся с восходящим потоком высокотемпературных газов. Скорости таких „трассеров“ изменяются в достаточно широком диапазоне (рис. 4) вследствие завихрений (рис. 3).

В результате выполненных экспериментов выделены особенности формирования рассматриваемых газопарокапельных смесей при варьировании размеров  $R_m$ , начальной температуры  $T_w$  и относительной концентрации примесей  $\gamma$  в воде в достаточно широких диапазонах, соответствующих, в частности, технологиям [1–6]. Введен в рассмотрение безразмерный параметр  $\Delta R$ , характеризующий изменение размеров капель при движении через высокотемпературную газовую среду, относительно их начального радиуса ( $\Delta R = (R_m - R_m^*)100/R_m^*$ , где  $R_m^*$  —



**Рис. 2.** Видеogramмы капель распыленной жидкости и поля скоростей „трассирующих“ частиц на входе (a) и выходе (b) из канала с высокотемпературными газами при  $T_w = 293$  K,  $\gamma = 10\%$  и  $0.05 \leq R_m \leq 0.37$  mm.



**Рис. 3.** Изолинии скоростей „трассирующих“ частиц на входе в область высокотемпературных газов при  $T_w = 303\text{ K}$ ,  $\gamma = 0\%$  и  $0.05 \leq R_m \leq 0.37\text{ mm}$ .

значение характерного радиуса капли на выходе из рабочего канала, mm).

На рис. 5 и 6 приведены зависимости параметра  $\Delta R$  от начального размера капель распыленной жидкости  $R_m$  для выделенных групп при  $T_w = 293\text{--}323\text{ K}$  и  $\gamma = 0\text{--}10\%$ .

Установлено (рис. 5) существенное влияние начальной температуры жидкости  $T_w$  на интегральные характеристики испарения при ее движении через рабочий канал 13 с газовой средой. Этот эффект обусловлен снижением времени прогрева жидкости до достижения условий интенсивного парообразования. С ростом  $T_w$  влияние выделенного эффекта значительно усиливается, и зависимость  $\Delta R = f(R_m)$  приобретает существенно нелинейный вид.

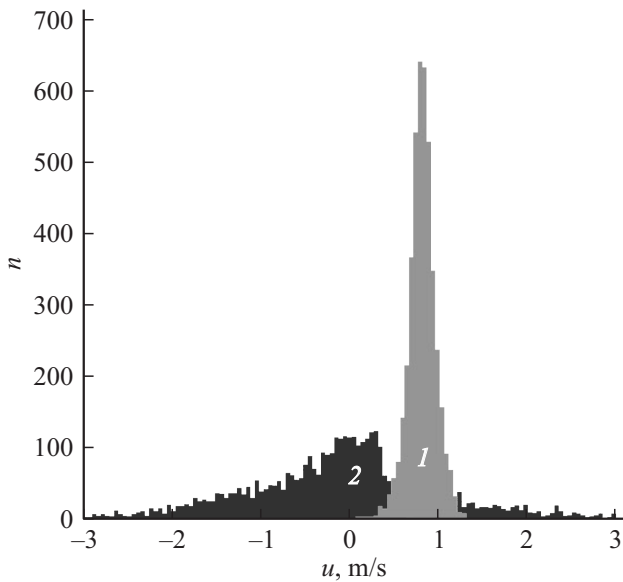
Результаты выполненных экспериментов показывают (рис. 6), что для капель распыленной жидкости с характерными размерами  $R_m < 0.4\text{ mm}$  влияние содержания типичных примесей солей при  $\gamma = 0\text{--}10\%$  на параметр  $\Delta R$  несущественно (изменение  $\Delta R$  менее 5%). Это

можно объяснить тем, что при уменьшении размеров капель воды снижается количество связей молекул воды с ионами соли [16]. Уменьшается температура фазового перехода системы „ $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$ “. Меньше энергии требуется для прогрева приповерхностного слоя этой системы и интенсификации фазового перехода. Как следствие, интегральные характеристики парообразования почти адекватны (рис. 6) распыленной воде без примесей солей ( $\gamma = 0\%$ ).

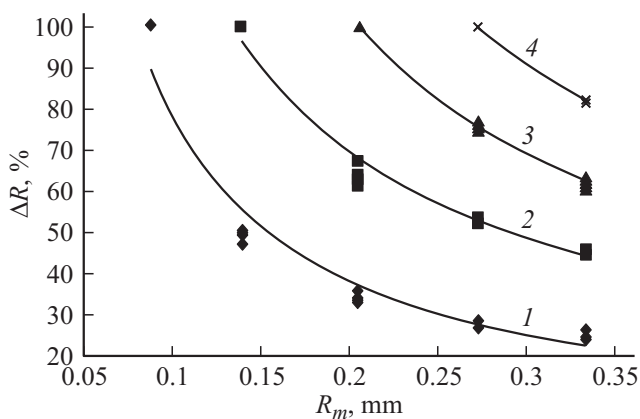
Следует отметить нелинейность функций  $\Delta R = f(R_m)$  при  $T_w = 293\text{--}323\text{ K}$  (рис. 5) и  $\gamma = 0\text{--}10\%$  (рис. 6). Это обусловлено в первую очередь нелинейной зависимостью скорости парообразования от температуры поверхности жидкости [21]. Эксперименты [15] и численные исследования [13,14] позволили установить условия, при которых совместное влияние капель на интегральные характеристики их испарения в области высокотемпературных газов может быть определяющим. В частности, показано [14], что с ростом размеров капель их совместное влияние усиливается. Особенно

это важно для капель, перемещающихся друг за другом в потоке высокотемпературных газов. Капли, идущие первыми, при интенсивном парообразовании создают условия для снижения температуры в окрестности последующих. Для относительно малых ( $R_m < 0.2$  mm) капель влияние этого фактора несколько снижается, так как для них характерны небольшие по размерам температурные и концентрационные „следы“ (области за каплями с существенно пониженной температурой и концентрацией газов) [13,14].

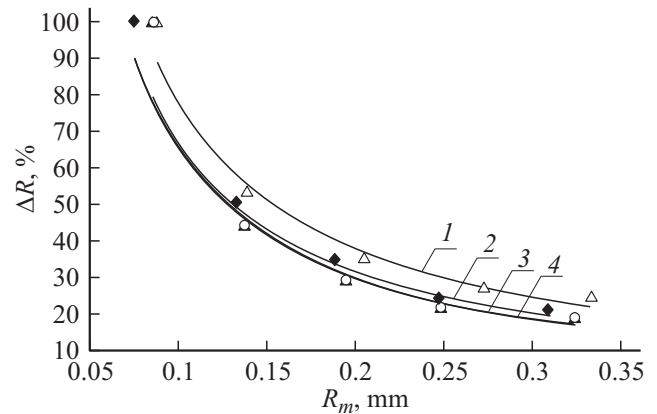
Установлено, что при движении потока распыленной жидкости через высокотемпературную газовую среду возможно проявление эффектов коагуляции (на выходе из рабочего канала можно выделить несколько объеди-



**Рис. 4.** Гистограммы скоростей капель распыленной жидкости на входе (1) и выходе (2) из области высокотемпературных газов при  $T_w = 303$  К,  $\gamma = 0\%$  и  $0.05 \leq R_m \leq 0.37$  mm ( $u$  — скорости „трассирующих“ частиц,  $n$  — количество векторов „трассирующих“ частиц на плоскости поля скорости).



**Рис. 5.** Зависимости параметра  $\Delta R$  от начального размера каплей ( $R_m$ ) распыленной жидкости ( $\gamma = 0\%$ ) при  $T_w$ , К: 1 — 293, 2 — 303, 3 — 313, 4 — 323.



**Рис. 6.** Зависимости параметра  $\Delta R$  от начального размера каплей ( $R_m$ ) распыленной жидкости ( $T_w = 293$  К) при  $\gamma$ , %: 1 — 0, 2 — 2.5, 3 — 5, 4 — 10.

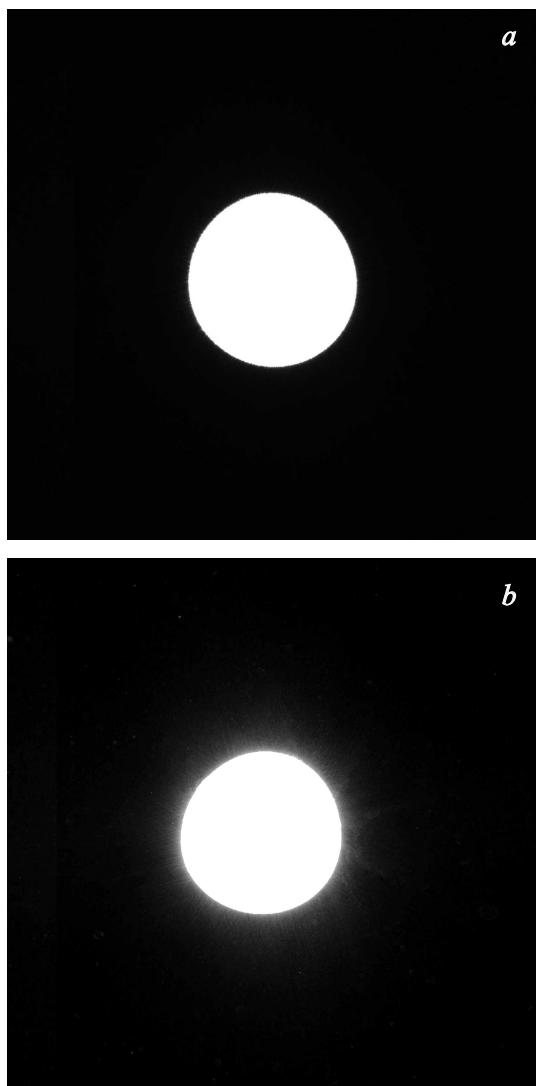
ненных капель практически в каждом опыте). Анализ видеороликов (рис. 2) и изолиний скоростей движения „трассирующих“ частиц (рис. 3) показывает, что слияние капель вызвано не столько формированием завихрений при встречном движении газового и парокapельного потоков, сколько замедлением движения капель, идущих во фронте парокapельной смеси (интенсивно испаряющихся), и ускорением движения последующих капель (испаряющихся с малой скоростью). Установленные особенности хорошо коррелируют с теоретическими следствиями [13,14]. Так, например, в [14] показано, что при расстоянии между двумя (адекватными по начальным размерам) последовательно движущимися через высокотемпературные газы каплями менее 5–7 их характерных размеров вторая капля испаряется лишь на 20–30% на момент полного испарения первой (значения  $R_m$  варьировали в диапазоне от 1 до 5 mm).

Следует отметить, что эксперименты не проводились при больших ( $u_m > 1$  м/с) скоростях встречного движения газового и парокapельного потоков. Это обусловлено существенными затруднениями анализа рассматриваемых процессов за счет наложения эффектов деформации, разрушения, дробления и турбулентного перемешивания капель [24]. К тому же высокие скорости, как правило, очень редко достигаются в технологиях [1–6]. При умеренных ( $u_m < 1$  м/с) скоростях движения капель жидкости и их относительно небольших ( $R_m < 0.35$  mm) размерах эффекты дробления капель и их турбулентного перемешивания не зарегистрированы в опытах. Эти результаты соответствуют основным положениям [24,25]. Известно [24], что при значениях размеров и скоростей капель, адекватным принятым в экспериментах, реализуются „докритические“ режимы их движения при устойчивых колебаниях —  $We < We_{lim}$  ( $We_{lim}$  — число Вебера, соответствующее „критической фазе“ распада капель). Установлено [24], что для капель воды, ртути, спирта и керосина предельное значение числа Вебера составляет  $We_{lim} \sim 10$ . В [25] показано, что критическое

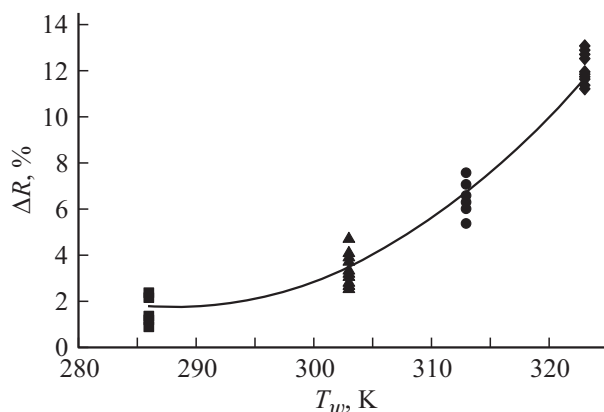
число Рейнольдса для движущейся в потоке газа капли, характеризующее переход от ламинарного к турбулентному режиму ее обтекания, составляет  $Re_{lim} \sim 3 \cdot 10^5$ . В выполненных экспериментах для капель распыленной жидкости при  $u_m < 1$  м/с значения числа Рейнольдса не превышали  $10^3$ .

Для оценки влияния значений  $T_w$  и  $\gamma$  на интегральные характеристики испарения „монолитных“ водяных структур в области высокотемпературных газов выполнены эксперименты с одиночными каплями, для которых условные радиусы  $R_m$  варьировали в диапазоне 3–5 мм, а скорости движения  $u_m$  соответствовали распыленному парокapельному потоку.

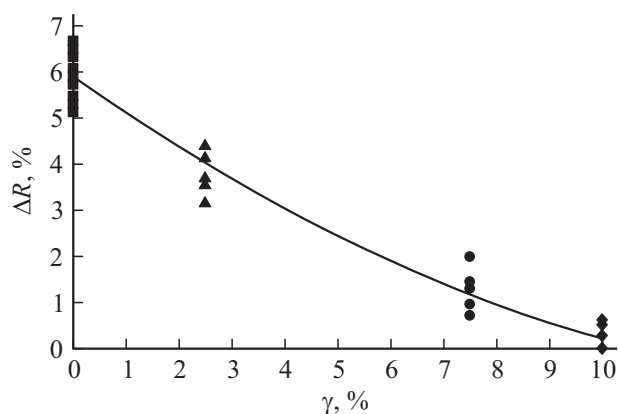
На рис. 7 приведены видеogramмы с изображениями одиночных капель при  $R_m = 3$  мм. Видно, что в отличие от капель распыленной жидкости изменение  $R_m$  происходит достаточно умеренно (менее 5%). При этом можно выделить „вращательное“ движение капли



**Рис. 7.** Видеogramмы одиночных капель жидкости на входе (а) и выходе (b) из области высокотемпературных газов при  $T_w = 293$  К,  $\gamma = 0\%$ ,  $R_m = 3$  мм.



**Рис. 8.** Зависимость параметра  $\Delta R$  от начальной температуры ( $T_w$ ) одиночных капель воды с  $R_m = 3$  мм и  $\gamma = 0\%$ .



**Рис. 9.** Зависимость параметра  $\Delta R$  от относительной концентрации примесей солей ( $\gamma$ ) в одиночных каплях воды с  $R_m = 3$  мм и  $T_w = 293$  К.

(в форме эллипсоида) в области высокотемпературных газов. Видеogramмы (рис. 7) хорошо коррелируют с изображениями свободно падающих капель [26,27]. При этом аналогично каплям из потоков распыленной жидкости для рассматриваемых одиночных капель воды выполнялись условия  $We < We_{lim}$  [24] и  $Re < Re_{lim}$  [25].

На рис. 8 и 9 представлены зависимости параметра  $\Delta R$  от  $T_w$  и  $\gamma$  при  $R_m = 3$  мм. Видно, что влияние  $T_w$  (рис. 8) на характеристики испарения крупных капель практически сопоставимо с установленным для капель распыленной жидкости (рис. 5).

Сравнительный анализ рис. 6 и 9 показывает, что, несмотря на менее интенсивное испарение крупных капель, влияние  $\gamma$  на  $\Delta R$  более существенно по сравнению с распыленными парожидкостными потоками. Это обусловлено тем, что при движении „монолитной“ массы воды влияние NaCl становится значительным. Усиливаются связи молекул воды с ионами соли [16]. Увеличивается температура фазового перехода (испарения) системы „H<sub>2</sub>O + NaCl“. Как следствие, возрастает энергия, затрачиваемая на прогрев приповерхностного слоя системы „H<sub>2</sub>O + NaCl“ и реализацию эндотермиче-



ского фазового перехода. При увеличении размеров одиночных капель до 5 mm влияние выявленного эффекта усиливается.

Зависимости  $\Delta R = f(R_m)$ ,  $\Delta R = f(T_w)$  и  $\Delta R = f(\gamma)$  показывают (рис. 5–9), что из основных начальных параметров распыленной жидкости определяющее значение при формировании газопарокапельной смеси с требуемым компонентным составом (например, [1–6]) имеют ее дисперсность ( $R_m$ ,  $\alpha_m$ ) и начальная температура ( $T_w$ ). Учитывая результаты исследования характеристик испарения распыленной жидкости в области высокотемпературных газов при различных скоростях движения капель и газовой среды [13,14], можно заключить, что при возрастании  $u_m$  относительно установленных в экспериментах влияние дисперсности и начальной температуры воды усилится. Некоторое уменьшение роли этих факторов возможно только при однонаправленном движении высокотемпературных газов и капель распыленной жидкости [13,14].

## Выводы

1. Начальная температура воды существенно влияет на компонентный состав формирующейся газопарокапельной смеси в широком диапазоне варьирования дисперсности (например, характерные размеры капель  $0.05 < R_m < 5$  mm) жидкости.

2. При мелкодисперсном ( $R_m < 0.35$  mm) распылении воды содержание в ней типичных примесей солей (с концентрацией около 10%) практически не влияет на интегральные характеристики испарения в области высокотемпературных газов в отличие от крупных (размеры более 5 mm) одиночных капель.

3. Компонентный состав газопарокапельных смесей для перспективных технологий [1–6] можно поддерживать в заданных интервалах при условии  $T_f = \text{const}$  за счет не столько уменьшения значений  $R_m$  или повышения  $\alpha_m$ , сколько изменения  $T_w$ . При этом возможно использование жидкости с различным содержанием типичных примесей.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов президента РФ (№ МК-620.2012.8) и РФФИ (№ 13-08-90703).

## Список литературы

- [1] Никитин М.Н. // Промышленная энергетика. 2010. № 6. С. 42–46.
- [2] Никитин М.Н. // Промышленная энергетика. 2010. № 12. С. 37–42.
- [3] Марьин Б.Н., Ким В.А., Сысоев О.Е. Обработка поверхностей в металлургии и машиностроении. Владивосток: Дальнаука, 2011. 421 с.
- [4] Исаев Е.А., Чернецкая И.Е., Крахт Л.Н., Титов В.С. Теория управления окомкованием сыпучих материалов. Старый Оскол: ТНТ, 2012. 384 с.
- [5] Копылов Н.П., Чибисов А.Л., Душкин А.Л., Кудрявцев Е.А. // Пожарная безопасность. 2008. № 4. С. 45–58.
- [6] Корольченко Д.А., Громовой В.Ю., Ворогушин О.О. // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20. № 9. С. 54–57.
- [7] Терехов В.И., Шаров К.А., Шишкин Н.Е. // Теплофизика и аэромеханика. 1999. Т. 6. № 3. С. 331–341.
- [8] Яламов Ю.И., Голикова Н.Н. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 2. С. 30–35.
- [9] Абросимов П.Б., Заплатин П.В., Нагорный В.С., Шмидт А.А. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 11. С. 39–43.
- [10] Анохина Е.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 32–37.
- [11] Демьянов А.Ю., Динариев О.Ю., Иванов Е.Н. // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85. № 6. С. 1145–1154.
- [12] Вараксин А.Ю. // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 3. С. 421–455.
- [13] Ysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. // J. Eng. Phys. Thermophys. 2013. Vol. 86. N 1. P.62–68.
- [14] Strizhak P.A. // J. Eng. Phys. Thermophys. 2013. Vol. 86. N 4. P. 895–904.
- [15] Волков Р.С., Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // Бутлеровские сообщения. 2013. Т. 35. № 9. С. 38–46.
- [16] Ильин А.П., Назаренко О.Б., Коршунов А.В., Рот Л.О. Особенности физико-химических свойств нанопорошков и наноматериалов. Томск: Изд-во ТПУ, 2012. 196 с.
- [17] Захаревиц А.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И. // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44. № 5. С. 54–57.
- [18] Keane R.D., Adrian R.J. // Appl. Sci. Res. 1992. Vol. 49. P. 191–215.
- [19] Westerweel J. // Meas. Sci. Technol. 1997. Vol. 8. P. 1379–1392.
- [20] Foucaut J.M., Stanislas M. // Meas. Sci. Technol. 2002. Vol. 13. P. 1058–1071.
- [21] Полежаев Ю.В., Юрьевич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 391 с.
- [22] Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1972. 381 с.
- [23] Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. АН СССР. Л.: Наука, 1968. 96 с.
- [24] Вольнский М.С. Необыкновенная жизнь обыкновенной капли. М.: Знание, 1986. 144 с.
- [25] Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газопарокапельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 284 с.
- [26] Дубовицкий В.В., Подвысоцкий А.М., Шрайбер А.А. // Инженерно-физический журн. 1990. Т. 58. № 5. С. 804–808.
- [27] Trinh E.H., Holt R.G., Thiessen D.B. // Phys. Fluids. 1996. Vol. 8. N 1. P. 43–61.