

Д. В. АНТОНОВ, студент Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: 1aadsdfn@gmail.com)

Р. С. ВОЛКОВ, младший научный сотрудник кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: romanvolkov@tpu.ru)

П. А. СТРИЖАК, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: pavelspa@tpu.ru)

УДК 536.4

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОСЛЕДСТВИЙ СТОЛКНОВЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ ПРИ ИХ ДВИЖЕНИИ ЧЕРЕЗ ПЛАМЯ В ВИДЕ ПОТОКА РАСПЫЛЕННОЙ ЖИДКОСТИ

Представлены результаты статистического анализа последствий столкновения капель типичной тушащей жидкости (воды) при их движении через пламя, выполненного с использованием панорамных оптических методов и кросскорреляционного видеокомплекса. Для генерации пламени в экспериментах использовано специализированное горелочное устройство, заполненное жидким топливом с хорошо изученными свойствами – керосином. Показано, что в экспериментах размеры (диаметры) капель варьировались от 0,1 до 0,5 мм, а скорости их движения – от 0,5 до 12 м/с. Выделено несколько типичных результатов столкновения двух капель с их коагуляцией, дроблением или разлетом в пламени. Определено влияние скоростей движения, размеров и траекторий перемещения капель на результаты столкновения.

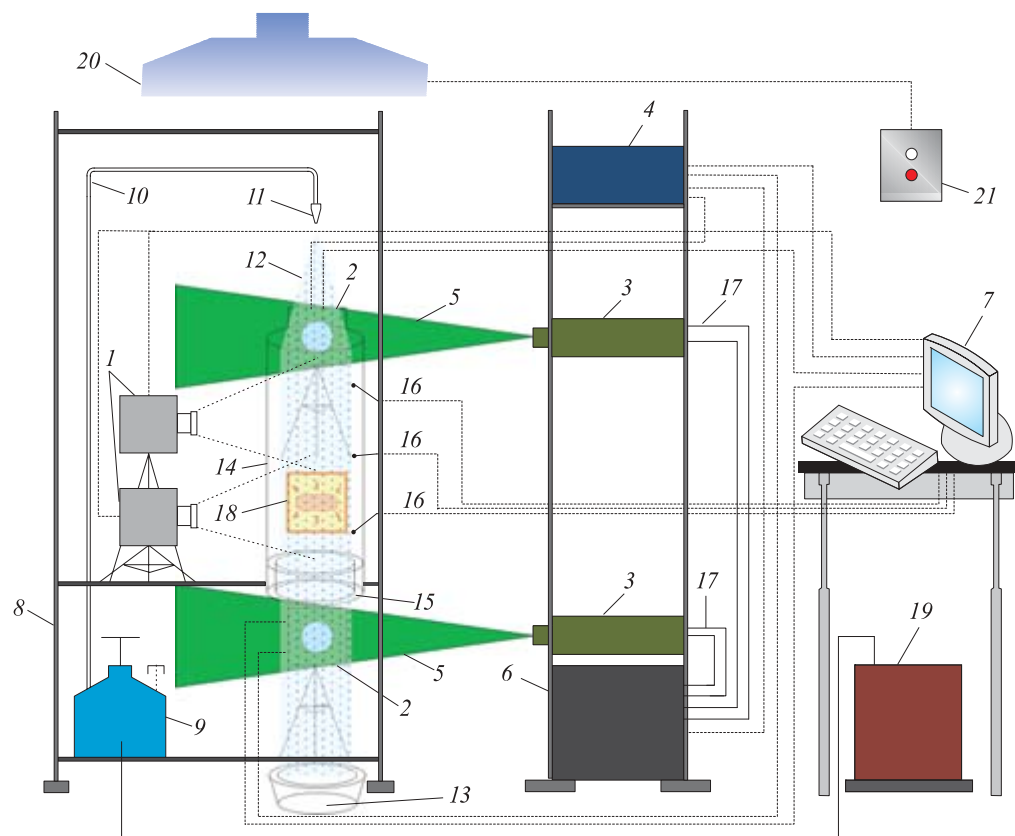
Ключевые слова: пламя; высокотемпературные газы; распыленная вода; капли; столкновение; коагуляция; дробление.

Введение

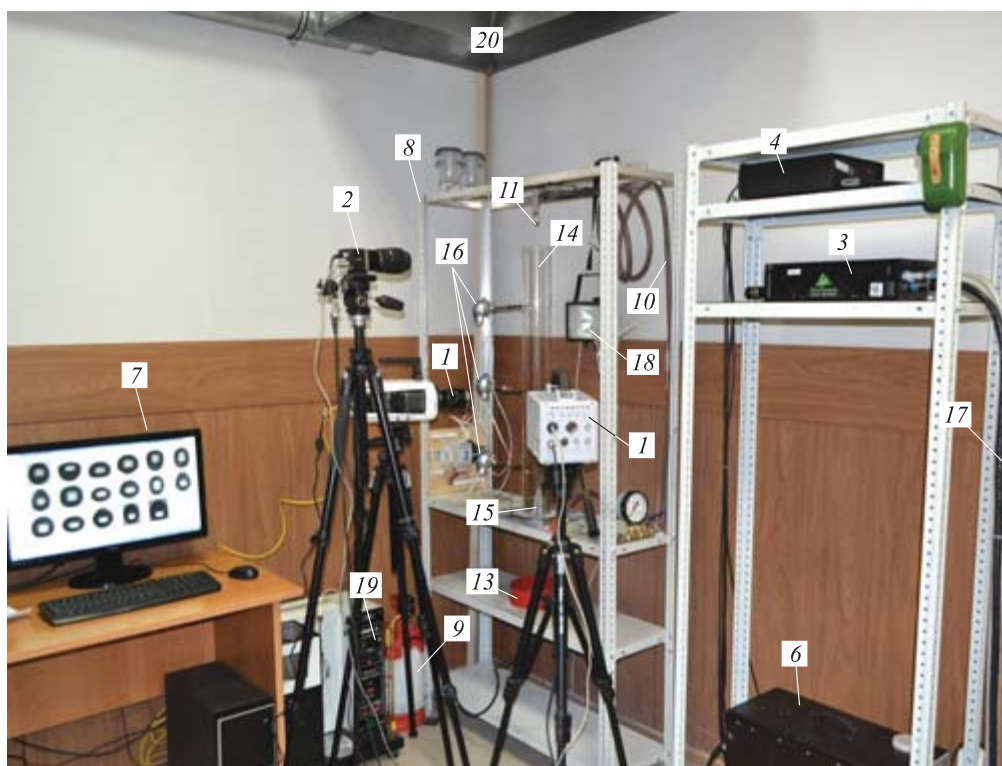
В соответствии с действующими во многих государствах программами ресурсоэффективности практически в каждой отрасли промышленности и сфере безопасности (в частности, пожарной) особое внимание уделяется минимизации (или оптимизации) расходования ресурсов. Многие специализированные системы пожаротушения (“водяной туман” [1, 2], водяная завеса [3–5], тонкораспыленная вода [6–10] и др.), на первый взгляд, обеспечивают минимизацию расхода тушащих жидкостных составов. Однако в реальной практике пожаротушения довольно сложно оценить необходимый для локализации или полной ликвидации пожаров объем тушащей жидкости [11–13]. Как следствие, расход таких жидкостей довольно значителен при ликвидации практически любых пожаров. Главными факторами, осложняющими такую оценку, являются существенно нестационарные процессы тепломассопереноса и гидродинамики в системе *жидкость – пламя*.

Выполненные в последние годы теоретические [10, 14, 15] и экспериментальные [16–19] исследо-

вания позволили определить массу жидкости, испаряющейся в зоне пламени в условиях, приближенных к реальным пожарам. В [10, 14, 15] определены концентрации газов и температуры, достигаемые в следе капель в результате интенсивного испарения, но при постановке задач приняты достаточно условные схемы движения капельных потоков воды через пламя. Эксперименты [16–19] показали, что при движении через пламя (высокотемпературные продукты сгорания) достаточно типичны процессы коагуляции, столкновения и дробления капель. Эти процессы приводят к существенному изменению структуры капельных потоков в пламени [16–19], поэтому представляет интерес экспериментальное изучение процессов взаимодействия двух капель в типичных пламенах для условий работы разных, наиболее широко используемых распылительных систем пожаротушения. Опыты [16–19] показали, что такие процессы можно экспериментально исследовать с высокой достоверностью лишь с применением современных “бесконтактных” панорамных оптических методов



a



b

Рис. 1. Схема (a) и внешний вид (б) экспериментальной установки: 1 — высокоскоростная видеокамера; 2 — кросскорреляционная камера; 3 — двойной твердотельный импульсный лазер; 4 — синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 5 — световой “нож”; 6 — генератор лазерного излучения; 7 — ПК; 8 — штатив; 9 — емкость с водой; 10 — канал подачи воды; 11 — распылитель; 12 — распыленная вода; 13 — уловитель; 14 — цилиндр из жаростойкого светопрозрачного материала; 15 — полый цилиндр с горючей жидкостью во внутреннем пространстве; 16 — термомпары; 17 — канал движения охлаждающей жидкости лазера; 18 — прожектор; 19 — нагревательная установка; 20 — нагнетательная система; 21 — пульт включения/отключения нагнетательной системы

“трассерной” визуализации, скоростных видеокамер и кросскорреляционных комплексов.

Цель настоящей работы — анализ последствий столкновений двух капель воды при их движении через пламя на базе результатов экспериментов с использованием панорамных оптических методов “трассерной” визуализации газо- и парожидкостных потоков.

Методика экспериментальных исследований

При проведении исследований использовался экспериментальный стенд (рис. 1), аналогичный по основным элементам установкам, применяемым в опытах [16–19]. В отличие от экспериментов [16–19], наряду с кросскорреляционным видеокомплексом, применялись две высокоскоростные (10^5 кадров в секунду) камеры со специализированным программным обеспечением “Тема Automotive”.

Аналогично экспериментам [16–19] регистрировались изображения капель воды в процессе их движения через высокотемпературные (около 1100 К) газы — продукты сгорания керосина в цилиндре из жаростойкого светопрозрачного стекла 14 (высотой 1 м, с внутренним и внешним диаметрами соответственно 0,2 и 0,206 м). Температура газов T_g в пламенной зоне горения измерялась тремя хромель-алюмелевыми термопарами 16 (с диапазоном измеряемых температур 273–1373 К и систематической погрешностью ± 3 К), которые устанавливались в цилиндре 14 на разной высоте (0,15; 0,50 и 0,85 м). Начальная температура вводимых в газовую среду капель воды T_w поддерживалась около 300 К с помощью системы нагревательных камер и хромель-копелевой термопары (с диапазоном измеряемых температур 273–473 К и систематической погрешностью $\pm 1,5$ К). Максимальные случайные погрешности измерения T_g достигали 20 К, а T_w — не более 3 К.

Размеры каждого видеокadra в области высокотемпературных газов выбирались в соответствии с характерной длиной регистрируемых участков траектории движения двух исследуемых сталкивающихся капель. По всей длине цилиндрического канала выполнялась видеосъемка. В результате обработки видеogramм отобрано более 1000 кадров с характерными столкновениями двух капель различных размеров при разных скоростях их движения и углах пересечения траекторий перемещения.

Начальные размеры (радиусы) капель в потоке распыленной жидкости изменялись от 0,05 до 0,25 мм. Относительная объемная концентрация капель жидкости в 1 м^3 газа γ_m поддерживалась в диапазоне 0,001–0,0012 м^3 . Выбор диапазонов изме-

нения радиусов капель r_m и их концентрации γ_m обусловлен специфическими ограничениями панорамных оптических методов “трассерной” визуализации PIV и SP [20–22], применяемых при обработке видеogramм экспериментов.

Скорости движения продуктов сгорания в области видеорегистрации u_g регулировались с использованием нагнетательной системы и составляли во всех экспериментах около 1,5 м/с. Скорости движения капель в потоке высокотемпературных газов u_m изменялись в диапазоне от 0,5 до 5 м/с.

Для измерения скоростей движения капель воды u_m и газов u_g применялся панорамный оптический метод PIV [20–22]. Скорости перемещения газов (продуктов сгорания) в экспериментах определялись до вдува капель распыленной жидкости. “Трассирующие” частицы нанопорошка диоксида титана вводились в поток газов в нижней части регистрационного канала 14. Аналогично методикам [20–22] регистрировались мгновенные распределения скоростей “трассеров” в потоке газов между вспышками лазера. Скорости движения капель воды определялись по скоростям перемещения “трассеров”, входящих в их объем, аналогично [20–22], а также с использованием программного обеспечения “Тема Automotive” и высокоскоростной видеорегистрации. Дополнительное применение высокоскоростной видеорегистрации позволило снизить систематические погрешности измерения скоростей u_m сталкивающихся капель до 0,01 м/с.

Размеры (радиусы) капель r_m определялись с использованием панорамного метода SP [20–22]. За потоком распыленной жидкости (относительно камеры) располагался диффузный (стробоскопический) источник света с равномерным пространственным распределением интенсивности. Плоскость фокусировки объектива камеры находилась в непосредственной близости к центру потока распыленной жидкости для получения наибольшей четкости теневой фотографии капель. Максимальные систематические погрешности измерения r_m не превышали 10^{-5} м. Максимальные случайные погрешности определения рассматриваемых параметров составляли: для r_m — 2,1 %, u_g и u_m — 3,4 %. Для определения случайных погрешностей измерений использовались методики [23–25].

При обработке видеogramм экспериментов определялись также углы пересечения траекторий движения капель в момент их столкновения α (рис. 2) с использованием программного обеспечения “Тема Automotive” и параметрической сетки на видеogramмах. В проведенных экспериментах значения α изменялись в диапазоне 20–160°.

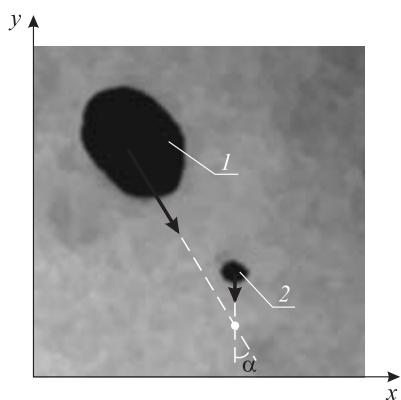


Рис. 2. Видеogramма с изображением каплей воды перед столкновением с обозначением направлений их движения и угла столкновения α (1, 2 — первая и вторая капли)

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 приведены типичные, следующие один за другим с указанной задержкой видеокadры с изо-

бражениями каплей воды в пламенной зоне горения при реализации трех выявленных вариантов последствий столкновений: 1 — коагуляция (слияние) (критерий P_1); 2 — разлет (образование двух каплей с характерными размерами, близкими к начальным) (критерий P_2); 3 — дробление (образование более трех каплей существенно меньшего размера относительно начального) (критерий P_3).

Анализ более 1000 кадров видеogramм проведенных экспериментов позволил определить частоту реализации каждого из трех последствий столкновений. При численной обработке результатов экспериментов использованы параметры:

$$P_1 = N_1 / (N_1 + N_2 + N_3); \quad P_2 = N_2 / (N_1 + N_2 + N_3);$$

$$P_3 = N_3 / (N_1 + N_2 + N_3),$$

где N_1, N_2, N_3 — число столкновений, в результате которых реализуются соответственно первый, второй и третий варианты последствий.

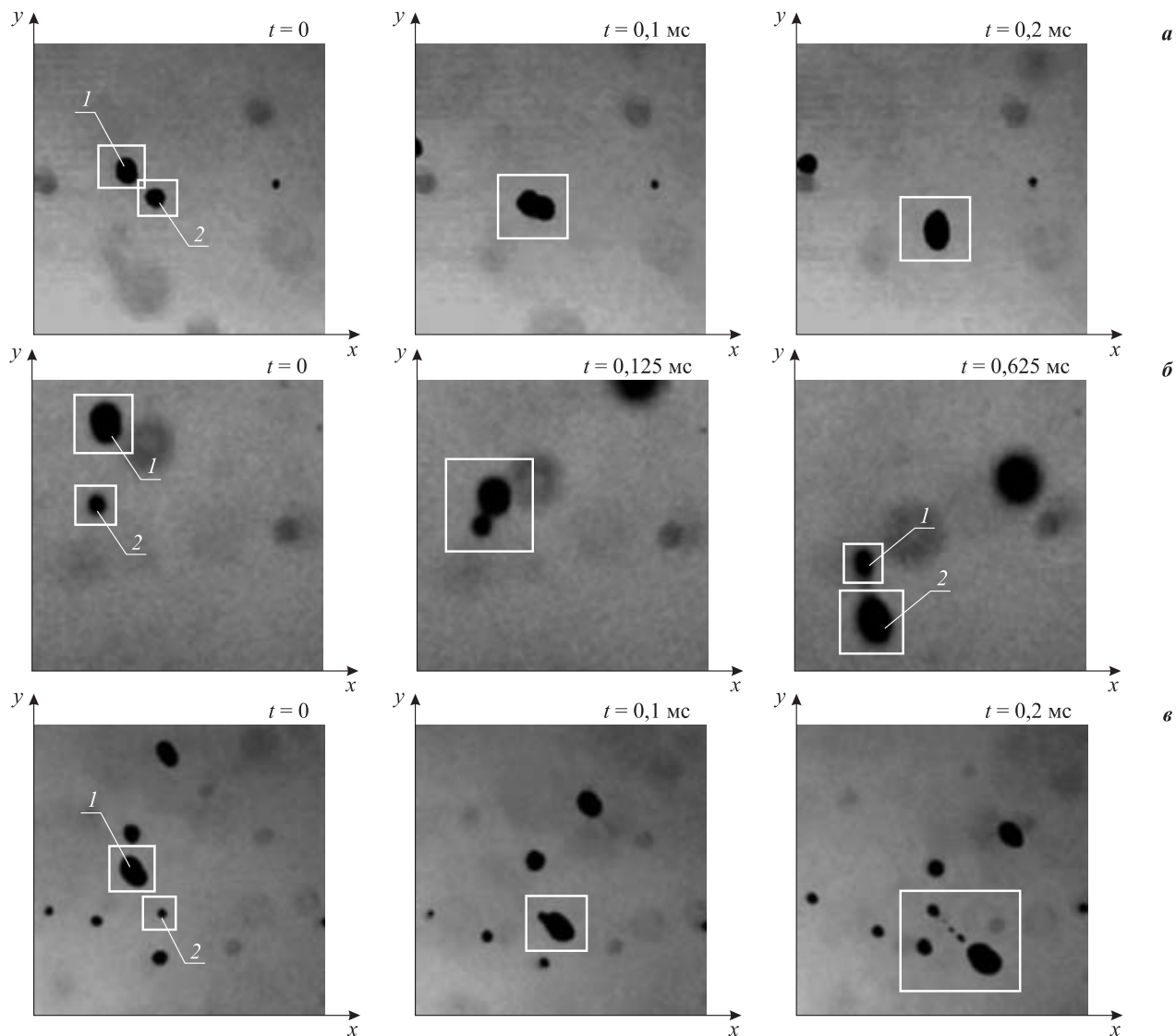


Рис. 3. Видеogramмы при реализации трех последствий столкновения двух каплей воды: а — коагуляция, б — разлет, в — дробление; 1, 2 — первая и вторая капли

На рис. 4 представлены типичные значения критериев P_1, P_2 и P_3 при изменении скоростей движения сталкивающихся капель. Следует отметить, что на рис. 4 приведены результаты выборки при изменении размеров капель в довольно широком диапазоне — от 0,075 до 0,25 мм. Рассмотрены 300 столкновений (по 50 столкновений при идентичных начальных параметрах исследуемого процесса). Скорость второй из двух сталкивающихся капель выбиралась довольно малой относительно скорости первой ($u_{m2} < u_{m1}$). Рассмотрены следующие диапазоны: $u_{m2} = 1 \div 3$ м/с, $u_{m1} = 1 \div 12$ м/с.

Из рис. 4 хорошо видно, что при малых и сопоставимых скоростях движения капель частота последствий их столкновения с последующей коагуляцией очень высока (соответствует максимальной, если анализировать число повторений результатов столкновений). Это обусловлено, скорее всего, тем, что силы вязкости и поверхностного натяжения превышают силы инерции при таких скоростях движения капель. При росте разности скоростей сталкивающихся капель частота последствий столкновений с разлетом (P_2) и дроблением (P_3) существенно увеличивается (см. рис. 4). При этом для максимальных ($u_{m1} \approx 12$ м/с) и минимальных ($u_{m2} \approx 1$ м/с) скоростей в проведенных экспериментах частота дробления (P_3) превышает частоту разлета (P_2).

Для определения влияния разности характерных размеров сталкивающихся капель на результат их взаимодействия выполнена выборка из представленных на рис. 4 частот столкновений с существенно отличающимися и сопоставимыми значениями r_m . Так, на рис. 5,а приведены значения P_1, P_2 и P_3 при сопоставимых размерах капель $r_{m1} \approx r_{m2} \approx 0,15$ мм. Из графиков видно, что при сопоставимых размерах капель рост разности скоростей их движения

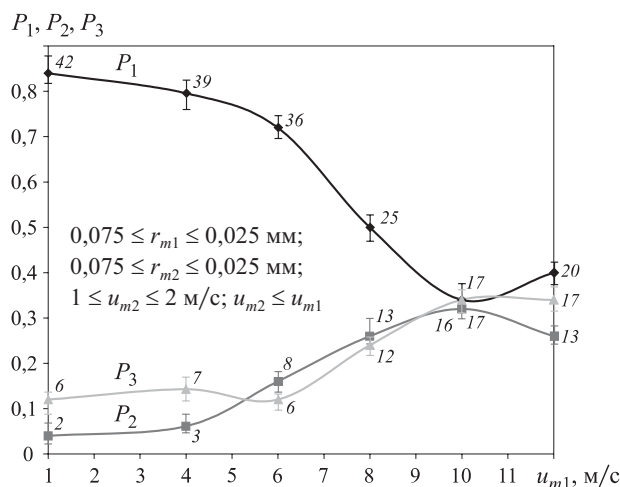


Рис. 4. Статистика происхождения каждого из трех последствий столкновений двух капель при изменении скорости перемещения одной из них: P_1 — коагуляция; P_2 — разлет; P_3 — дробление (значения у точек — число столкновений)

приводит к увеличению частоты разлета и уменьшению числа столкновений с коагуляцией, а частота дробления при этом минимальна. Этот результат, скорее всего, обусловлен тем, что при сопоставимых размерах и малых скоростях движения капель их импульсы (характеризующие механическое движение тел и определяемые их скоростями перемещения и массами) практически идентичны. Как следствие, силы инерции при столкновении минимальны, а силы поверхностного натяжения и вязкости существенны, что приводит к доминированию процесса коагуляции. С ростом скорости движения одной из капель при равных значениях r_m площади их поверхностей остаются сопоставимыми, но импульсы различаются, поэтому капли после слияния разлетаются с сохранением характерных площадей поверхностей, но с разными скоростями.

При кратном различии и скоростей перемещения, и размеров капель частота последствий их столкновений с реализацией процесса дробления существенно возрастает (рис. 5,б). В этом случае импульсы сталкивающихся капелькратно различаются вследствие разных значений r_m и u_m . Видеограммы экспериментов показали, что либо большие капли “поглощают” малые и происходит коагуляция, либо большие капли, движущиеся с высокой скоростью, сталкиваются с малыми и происходит дробление (см. рис. 5,б). Численный анализ результатов экспериментов позволил сделать вывод о том, что при высоких ско-

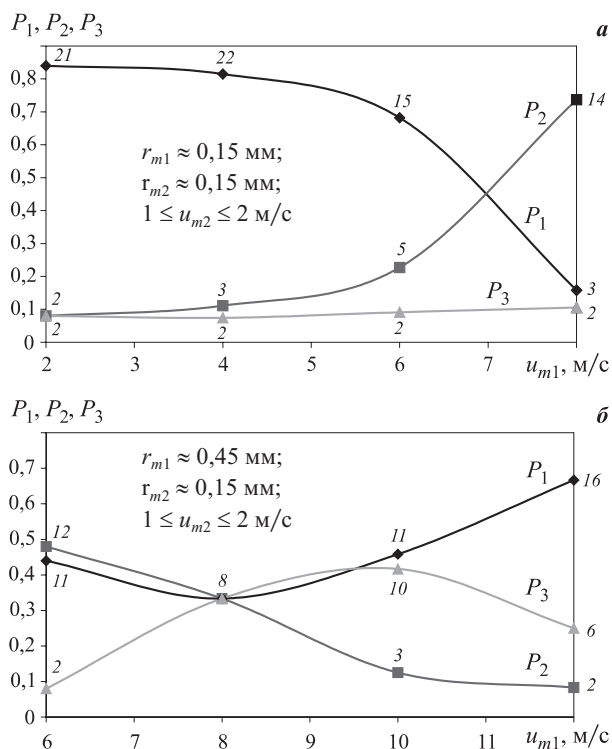


Рис. 5. Выборка статистики столкновений двух капель с одинаковыми (а) и кратно отличающимися (б) размерами: P_1 — коагуляция; P_2 — разлет; P_3 — дробление

ростях движения и больших размерах капель для их дробления достаточно взаимодействие даже с очень малыми и почти “покоящимися” ($u_{m2} \ll u_{m1}$) каплями.

На первый взгляд, помимо размеров r_m и скоростей u_m , существенно на результат столкновения капель может влиять угол пересечения траекторий их движения α . На рис. 4 и 5 приведены частоты реализации трех установленных вариантов столкновений при изменении угла α в широком диапазоне — от 20 до 160°. Вследствие монотонных зависимостей для P_1, P_2 и P_3 можно сделать вывод о довольно умеренном влиянии угла α на результат столкновения. Этот достаточно неочевидный результат статистического анализа развивает современные представления теории гидродинамики и теплопереноса для газочапельных систем [26]. Эксперименты показали, что влияние параметра α на результат столкновения может усилиться при повышении скоростей перемещения обеих капель относительно максимальных (10 м/с).

Выявленные в экспериментах последствия столкновений капель свидетельствуют о довольно сложном характере реализации этих процессов в пламенной зоне горения. Учитывая высокие значения P_1 (в широком диапазоне изменения u_m и r_m), можно сделать вывод о правомерности заключений [16–19] о сложности механизма коагуляции капель тушащих жидкостных составов в пламени (по результатам анализа видеogramм экспериментов [18, 19] выделены три режима коагуляции). В то же время зависимости, установленные для P_1 , позволили определить условия, при которых частота реализации процесса коагуляции минимальна. Это важно для правильного выбора начальных параметров распыления капель воды в зоне пламени с целью эффек-

тивного использования всей массы тушащей жидкости. В соответствии с [10, 14, 15] под эффективно задействованной понимается масса воды, полностью испарившейся в зоне пламени, в результате чего происходит снижение температуры в зоне горения и вытеснение из нее водяными парами продуктов сгорания и окислителя. Для пламен разной высоты определены [16–19] диапазоны оптимальных размеров капель, их концентрации в потоке и характерные скорости движения через пламя, при которых возможно практически полное испарение воды. С учетом установленных в настоящей работе последствий столкновений возможно прогнозирование изменения начальных параметров u_m и r_m и концентрации капель в потоке для обеспечения требуемой полноты испарения капель.

Заключение

Установленные в экспериментах варианты последствий столкновения двух капель воды в высокотемпературном газовом потоке позволяют прогнозировать условия движения капель распыленных тушащих жидкостей через типичные пламена. На основе этих вариантов можно выбирать параметры подачи жидкости в зону пламени и расположения распылителей (относительно друг друга), при которых будет обеспечиваться требуемое измельчение капель потока или их укрупнение. Это, в свою очередь, позволит формировать полидисперсные капельные потоки для минимизации расхода массы тушащей жидкости при сохранении ее огнетушащей способности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 14-39-00003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саламов А. А. Современная система пожаротушения “водяной туман” высокого давления // Энергетик. — 2012. — № 3. — С. 16–18.
2. Терпигорьев В. С. Водяной туман как средство защиты объектов культуры // Алгоритм безопасности. — 2006. — № 5. — С. 18–20.
3. Виноградов А. Г. Учет спектрального состава теплового излучения при расчете коэффициента пропускания капли воды // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 9. — С. 64–73.
4. Виноградов А. Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 1. — С. 45–56.
5. Виноградов А. Г. Применение теории затопленных струй к расчету параметров водяных завес // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 5. — С. 76–87.
6. Karpov A. I., Novozhilov V. B., Galat A. A., Bulgakov V. K. 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.
7. Корольченко Д. А., Громовай В. Ю., Ворогушин О. О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 9. — С. 54–57.

8. Сокоиков В. В., Тугов А. Н., Гришин В. В., Камышев В. Н. Автоматическое водяное пожаротушение с применением тонкораспыленной воды на электростанциях // Энергетик. — 2008. — № 6. — С. 37–38.
9. Сегаль М. Д. Использование тонкораспыленной воды для повышения противопожарной защиты кабельных сооружений АЭС // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2011. — № 4. — С. 61–64.
10. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 5. — С. 74–78.
11. Щетинский Е. А. Тушение лесных пожаров. — М. : ВНИИЛМ, 2002. — 328 с.
12. Баратов А. Н. Горение — Пожар — Взрыв — Безопасность. — М. : ФГУП ВНИИПО МЧС России, 2003. — 364 с.
13. Горшков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей. — М. : Пожнаука, 2007. — 268 с.
14. Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Тепломассоперенос при движении капель воды в высокотемпературной газовой среде // Инженерно-физический журнал. — 2013. — Т. 86, № 1. — С. 59–65.
15. Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние распределения капель воды в “водяном снаряде” на температуру в его следе // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 2. — С. 9–17.
16. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. О некоторых физических закономерностях испарения распыленной воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 323, № 2. — С. 201–207.
17. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование влияния начальной температуры распыленной воды на интенсивность ее испарения при движении через пламя // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 3. — С. 12–21.
18. 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.
19. 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.
20. Keane R. D., Adrian R. J. Theory of cross-correlation analysis of PIV images // Applied Scientific Research. — 1992. — Vol. 49, Issue 3. — P. 191–215. doi: 10.1007/bf00384623.
21. Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry // Measurement Science and Technology. — 1997. — Vol. 8, No. 12. — P. 1379–1392. doi: 10.1088/0957-0233/8/12/002.
22. 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, No. 7. — P. 1058–1071. doi: 10.1088/0957-0233/13/7/313.
23. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. — М. : Мир, 1972. — 381 с.
24. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений / Академия наук СССР. — 3-е изд., испр. и доп. — Л. : Наука, 1968. — 96 с.
25. Полежаев Ю. В., Юрьевич Ф. Б. Тепловая защита. — М. : Энергия, 1976. — 391 с.
26. Терехов В. И., Пахомов М. А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокapельных потоках. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. — 284 с.

Материал поступил в редакцию 3 февраля 2015 г.

English

STATISTICAL ANALYSIS OF THE EFFECTS OF WATER DROPLETS COLLISION AT THEIR MOVEMENT THROUGH THE FLAME AS A SPRAYED LIQUID STREAM

ANTONOV D. V., Student of Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: 1aadsdfn@gmail.com)

VOLKOV R. S., Low Researcher of Heat and Power Process Automation Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: romanvolkov@tpu.ru)

STRIZHAK P. A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Heat and Power Process Automation Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: pavelspa@tpu.ru)

ABSTRACT

The scheme, technique and results of experiments on statistical analysis of the effects of water droplets collision at their movement through the flame as a sprayed liquid stream are provided in this work. For receiving results of experimental research the modern high-speed video registration means, a cross-correlation video complex, and also the advanced methods and algorithms of information processing were used. It is established that errors of measurement of the water droplet sizes were no more than 2,1 %, speeds of gases and droplets — 3,4 %.

Several characteristic modes of collision of droplets at the movement through a flame are revealed. The reasons of emergence of the revealed modes are established and the corresponding facsimiles are provided. Probabilities of approach of each collision modes (coagulation, crushing and scattering) are defined. The dependences illustrating the frequency of emergence of each collision mode and allowing predicting the collision modes are received.

It is shown that on the basis of the revealed consequences of collisions of liquid droplets it is possible to choose parameters of its giving in a zone of a flame and an arrangement of sprays (relatively each other). The demanded crushing of a stream of droplets or their integration will be provided thus.

Keywords: flame; high-temperature gases; water spray; droplets; collision; coagulation; fragmentation.

REFERENCES

1. Salamov A. A. Sovremennaya sistema pozharotusheniya "vodyanoy tuman" vysokogo davleniya [Modern fire extinguishing system "a water fog" high pressure]. *Energetik — Power & Electrical Engineering*, 2012, no. 3, pp. 16–18.
2. Terpigoryev V. S. Vodyanoy tuman kak sredstvo zashchity obyektov kultury [Water mist as a means of cultural objects protection]. *Algoritm bezopasnosti — Security Algorithm*, 2006, no. 5, pp. 18–20.
3. Vinogradov A. G. Uchet spektralnogo sostava teplovogo izlucheniya pri raschete koeffitsienta propuskaniya kapli vody [Accounting of thermal radiation spectral distribution at calculation of water droplet transmittance]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 9, pp. 64–73.
4. Vinogradov A. G. Metodika rascheta ekraniruyushchikh svoystv vodyanykh zaves [Calculation method of water curtain shielding properties]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 45–56.
5. Vinogradov A. G. Primeneniye teorii zatoplennykh struy k raschetu parametrov vodyanykh zaves [Application of the submerged jet theory to calculation of water curtain parameters]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 5, pp. 76–87.
6. Karpov A. I., Novozhilov V. B., Galat A. A., Bulgakov V. K. 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, pp. 753–764.
7. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysotnykh zdaniyakh [Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 9, pp. 54–57.
8. Sokovikov V. V., Tugov A. N., Grishin V. V., Kamyshev V. N. Avtomaticheskoye vodyanoye pozharotusheniye s primeneniym tonkoraspylennoy vody na elektrostantsiyakh [Automatic water fire extinguishing with using of sprayed water at power plants]. *Energetik — Power & Electrical Engineering*, 2008, no. 6, pp. 37–38.
9. Segal M. D. Ispolzovaniye tonkoraspylennoy vody dlya povysheniya protivopozharnoy zashchity kabelnykh sooruzheniy AES [The water mist system for cable construction of nuclear power plant fire protection]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy — Problems of Safety and Emergency Situations*, 2011, no. 4, pp. 61–64.
10. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Chislennaya otsenka optimalnykh razmerov kapel vody v usloviyakh yeye raspyleniya sredstvami pozharotusheniya v pomeshcheniyakh [Numerical estimation of optimum sizes for water drops at the conditions of its dispersion by firefighting devices at placements]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 5, pp. 74–78.

11. Shchetinskiy E. A. *Tusheniye lesnykh pozharov* [Forest fire extinguishing]. Moscow, VNIILM Publ., 2008. 328 p.
12. Baratov A. N. *Goreniye — Pozhar — Vzryv — Bezopasnost* [Burning — Fire — Explosion — Safety]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2003. 364 p.
13. Gorshkov V. I. *Tusheniye plameni goryuchikh zhidkostey* [Flammable liquids flames extinguishing]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2007. 268 p.
14. Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. *Teplomassoperenos pri dvizhenii kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede* [Heat and mass transfer in the process of movement of water drops in a high-temperature gas medium]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 1, pp. 59–65.
15. Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. *Vliyaniye raspredeleniya kapel vody v “vodyanom snaryade” na temperaturu v yego slede* [Influence of water droplets distribution in the “water shell” on temperature in follow movement]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 2, pp. 9–17.
16. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. *O nekotorykh fizicheskikh zakonomernostyakh ispareniya raspylennoy vody pri dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya* [About some physical evaporation regularities of the sprayed water at movement through high-temperature combustion products]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 2, pp. 201–207.
17. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. *Eksperimentalnoye issledovaniye vliyaniya nachalnoy temperatury raspylennoy vody na intensivnost yeye ispareniya pri dvizhenii cherez plamya* [Experimental investigation of initial temperature for sprayed water influence on the evaporation intensity at the moving through flame]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 3, pp. 12–21.
18. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. *Vliyaniye nachalnykh parametrov raspylennoy vody na kharakteristiki yeye dvizheniya cherez vstrechnyy potok vysokotemperaturnykh gazov* [Influence of initial parameters of the sprayed water on characteristics of its movement through a counter flow of high-temperature gases]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2014, vol. 84, no. 7, pp. 15–23.
19. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. *Osobennosti ispareniya dvukh kapel vody, dvizhushchikhsya posledovatelno cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya* [Evaporation of two liquid droplets moving sequentially through high-temperature combustion products]. *Teplofizika i aeromekhanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 269–272.
20. Keane R. D., Adrian R. J. *Theory of cross-correlation analysis of PIV images*. *Applied Scientific Research*, 1992, vol. 49, issue 3, pp. 191–215. doi: 10.1007/bf00384623.
21. Westerweel J. *Fundamentals of digital particle image velocimetry*. *Measurement Science and Technology*, 1997, vol. 8, no. 12, pp. 1379–1392. doi: 10.1088/0957-0233/8/12/002.
22. 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, no. 7, pp. 1058–1071. doi: 10.1088/0957-0233/13/7/313.
23. Shenk Kh. *Teoriya inzhenerenogo eksperimenta* [Theory of engineering experiment]. Moscow, Mir Publ., 1972. 381 p.
24. Zaydel A. N. *Elementarnyye otsenki oshibok izmereniy* [Simple estimates of measurement errors]. The Academy of Sciences of the USSR. Leningrad, Nauka Publ., 1968. 96 p.
25. Polezhaev Yu. V., Yuryevich F. B. *Teplovaya zashchita* [Thermal protection]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 391 p.
26. Terekhov V. I., Pakhomov M. A. *Teplomassoperenos i gidrodinamika v gazokapelnykh potokakh* [Heat and mass transfer and hydrodynamics in gas-drop streams]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2009. 284 p.