

И. С. ВОЙТКОВ, аспирант кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: i.voytkov@ges.tomsk.ru)

Р. С. ВОЛКОВ, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: romanvolkov@tpu.ru)

О. В. ВЫСОКОМОРНАЯ, канд. физ.-мат. наук, инженер-исследователь (постдок) кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: vysokomornaja@tpu.ru)

А. О. ЖДАНОВА, ассистент кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: zhdanovaao@tpu.ru)

УДК 536.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТУШЕНИЯ МОДЕЛЬНЫХ ОЧАГОВ ПОЖАРА РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ВО ВРЕМЕНИ И ПРОСТРАНСТВЕ КАПЕЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ ВОДЫ

Проведены экспериментальные исследования процессов тушения модельных очагов пожара распределенными во времени и пространстве капельными потоками воды. Использована диагностическая система на базе высокоскоростного (до 10^6 кадров в секунду) и кросскорреляционного программно-аппаратного комплекса, реализующая панорамные оптические методы диагностики потоков (PIV, PTV, IPI, SP). Показана возможность тушения модельных очагов, соответствующих низовому и верховому лесным пожарам, с использованием системы, генерирующей распределенные во времени и пространстве капельные потоки воды. Установлены оптимальные сочетания параметров распыления (размеры капель в потоке и комбинации распылительных форсунок), обеспечивающие наименьшие времена тушения модельных очагов и объемы затраченной на тушение воды.

Ключевые слова: модельный очаг пожара; высокотемпературные газы; капли воды; тушение; испарение.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.56-65

Введение

Лесные пожары традиционно считаются одним из самых опасных видов возгораний, причиняющих наибольшие убытки экономике государств [1–4]. В результате низовых и верховых лесных пожаров ежегодно в нашей стране выгорают тысячи гектаров леса, попадают под угрозу исчезновения целые экосистемы. Кроме всего прочего, происшествия последних лет в Хакасии, Забайкальском крае и Бурятии показали, насколько опасным и непредсказуемым может быть лесной пожар. Огонь быстро распространялся по надпочвенному покрову, охватывал жилые и нежилые постройки, что привело к выгоранию нескольких жилых районов.

Самым распространенным методом локализации (предотвращения дальнейшего распространения) лесного пожара по-прежнему остается сброс больших объемов тушащей среды с авиационного средства [5, 6]. Однако, как это традиционно подчеркивается специалистами [2–6], эффективность таких способов борьбы с пожарами невысока: более 95 % сбрасываемой при этом жидкости расходуется впустую. Отсюда очевидно, что поиск эффективных способов распыления тушащей жидкости и оптимальных механизмов тушения является актуальной задачей. При этом важно опираться на результаты проведенных ранее теоретических и экспериментальных исследований (в частности, [7–14]),

описывающих основные закономерности движения и испарения распыленных капельных потоков в среде высокотемпературных продуктов сгорания.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование основных характеристик движения распределенных во времени и пространстве капельных потоков воды через модельные очаги, соответствующие низовому и верховому лесным пожарам.

Методика экспериментальных исследований

При проведении исследований по тушению модельных очагов лесных горючих материалов (ЛГМ) применялся стенд, схема которого приведена на рис. 1. По основным элементам он аналогичен использованным при проведении опытов, описанных в [11, 12], и представляет собой систему тушения модельных очагов возгорания класса А (по классификации Технического регламента о требованиях пожарной безопасности [15]). Внутри металлического каркаса 27 устанавливался специальный резервуар 23 (см. рис. 1), выполненный в форме па-

раллелепипеда со стенками из оргстекла толщиной 5 мм. Размеры резервуара: ширина — 1,2 м; глубина — 0,6 м; высота — 0,75 м. Во избежание оплавления дно и стенки резервуара дополнительно покрывались листовым асбестом толщиной 10 мм. Резервуар служил для размещения в нем модельных очагов пламени 24.

Для видеорегистрации тушения модельных очагов пламени ЛГМ использовалась высокоскоростная CMOS-видеокамера “Phantom V411” 2 (максимальный размер изображения 1280×1280 пикселей, максимальная частота съемки $6 \cdot 10^5$ кадров в секунду), которая позволяла регистрировать время тушения t_e модельных очагов с точностью до 0,001 с.

Для создания потока распыленной жидкости использовалась группа распылительных форсунок 17, генерирующих полидисперсные капельные потоки. Размеры (радиусы) генерируемых форсунками каплей жидкости R_d (мм) варьировались в широком диапазоне — $R_d = 0,02 \div 0,35$ мм. Для подачи воды на распылительные форсунки применялась система, состоящая из баллона 14 с тушащей жидкостью (с внут-

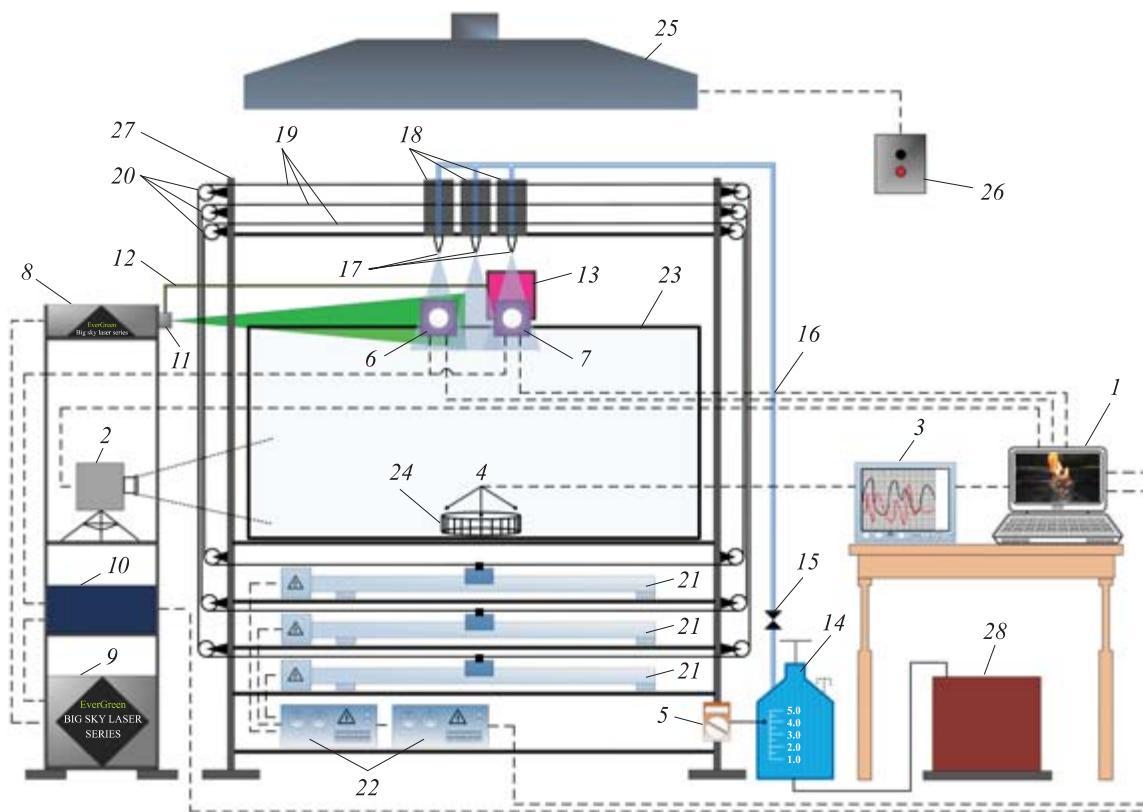


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — рабочая станция (персональный компьютер — ПК); 2 — высокоскоростная видеокамера; 3 — регистратор многоканальный технологический (PMT); 4 — термопары типа К; 5 — цифровой измеритель температуры в комплекте с термопарами типа L; 6, 7 — кросскорреляционные видеокамеры; 8 — двойной импульсный Nd:YAG лазер; 9 — генератор лазерного излучения; 10 — синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 11 — делитель лазерного луча; 12 — оптический световод; 13 — диффузный экран; 14 — емкость с жидкостью; 15 — запорный вентиль; 16 — канал подачи жидкости; 17 — распылительные форсунки; 18 — каретки для закрепления форсунок; 19 — тросы; 20 — роликовые блоки; 21 — моторизованные координатные механизмы; 22 — блоки питания координатных механизмов; 23 — резервуар; 24 — подложка с ЛГМ; 25 — нагнетательная система; 26 — пульт включения/выключения нагнетательной системы; 27 — металлический каркас стенда; 28 — нагревательная камера

ренным давлением $P = 50\div 300$ кПа), запорного вентиля 15 и термостойкого канала для подачи жидкости 16. Для каждого диапазона дисперсности в проведенных экспериментах варьировались следующие параметры: удельный расход жидкости форсункой μ_w (л/с); скорость движения капельного потока U_d (м/с); средний размер капель в распыленном потоке R_d .

В качестве модельных очагов возгорания класса А использовались очаги, соответствующие верховому и низовому лесным пожарам. Для создания очагов, соответствующих низовому лесному пожару, использовался металлический поддон размерами $\Pi \times \Gamma \times B \approx 0,35 \times 0,2 \times 0,05$ м, заполненный смесью ЛГМ (% масс.): листья березы — 25; хвоя сосны — 15; ветки лиственных пород деревьев — 60. Очаги, соответствующие верховому лесному пожару, создавались из брусков сосны сечением $0,01\text{--}0,02$ м² и длиной $0,1\text{--}0,15$ м. Модельные очаги конструировались по аналогии с методикой, описанной в ГОСТ Р 51057–2001. Высота модельных очагов варьировалась в диапазоне $0,02\text{--}0,08$ м.

Навески ЛГМ предварительно подсушивались в течение 3–5 сут при температуре около 300 К. Непосредственно перед проведением цикла экспериментов осуществляли контрольный замер влажности материалов методом термической сушки. Для этих целей исследуемый образец ЛГМ измельчали, предварительно взвесив на весах, и затем помещали в сушильную печь с температурой около 370–375 К на 2–3 ч. Далее образец вынимали из печи и подвергали охлаждению, после чего вторично взвешивали. Влажность образца ЛГМ γ_f (%) определялась по формуле: $\gamma_f = (m_{fw} - m_{fd}) / m_{fw} \cdot 100$ (где m_{fw} , m_{fd} — масса образца ЛГМ соответственно до и после сушки, г). Влажность γ_f используемых типов ЛГМ составляла:

- листьев березы — 5–8 %;
- хвои сосны — 7–10 %;
- веток лиственных пород деревьев (береза, осина) — 10–14 %;
- брусков сосны — 12–15 %.

Для тушения навесок ЛГМ применялась дистиллированная вода (по ГОСТ 6709–72).

Тушение модельных очагов обеспечивалось распылительными форсунками 17, установленными в верхней части экспериментального стенда (см. рис. 1). Для закрепления распылительных форсунок использовались специальные каретки 18 (снабженные роликовым механизмом), имеющие одну степень свободы и способные осуществлять равноускоренное поступательное перемещение вдоль установленных по всей ширине резервуара направляющих реек. Для перемещения распылительных форсунок стенд оснащен тремя моторизованными координат-



Рис. 2. Изображение установленных на экспериментальном стенде моторизованных координатных механизмов (обозначения см. на рис. 1)

ными механизмами 21, установленными в нижней части экспериментального стенда (рис. 2). Каждый координатный механизм состоял из модуля линейного перемещения, сервопривода с соединительной муфтой и блока контроллера (для управления перемещением). Подвижная площадка каждого координатного механизма посредством троса 19, пропущенного через четыре стационарно закрепленных на стенде роликовых блока 20, соединялась с кареткой 18 соответствующей форсунки 17. Полный ход форсунок на экспериментальном стенде составлял около 0,5 м. Управление координатными механизмами осуществлялось с рабочей станции 1 с использованием программного обеспечения «МотоМастер». При помощи ПО для каждого координатного механизма регулировались такие параметры, как скорость перемещения площадки (и, соответственно, распылительной форсунки) U_p (м/с), а также ее начальное и конечное положение. Скорость U_p в проведенных экспериментах изменялась в диапазоне $0,01\text{--}0,15$ м/с.

Высоту закрепления h_p (м) распылительных форсунок 17 относительно дна резервуара 23 регулировали вручную (посредством резьбового соединения с применением нескольких вертикально установленных шпилек) в диапазоне $0,1\text{--}1,2$ м.

Весь цикл экспериментов можно разделить на два этапа. На первом регистрировали время полно-



Рис. 3. Внешний вид модельных очагов, соответствующих низовому (а) и верховому (б) лесным пожарам (в процессе горения)

го выгорания модельных очагов t_b (с) при отсутствии процесса тушения. Для каждого типа модельного очага 24 проводили не менее чем по 20 экспериментов. На втором этапе реализовывалось тушение модельных очагов посредством поочередного последовательного перемещения над очагом форсунок, генерирующих капли разной дисперсности. Варьировались следующие параметры: высота установки форсунок h_p ; скорость перемещения форсунок U_p ; размеры генерируемых капель R_d ; количество (комбинация) форсунок, задействованных в тушении.

После зажигания модельного очага (рис. 3) одновременно запускались процессы перемещения первой форсунки и распыления тушащей жидкости. В момент времени (фиксирувался при анализе видеозаписи камеры 2), когда факел распыла первой форсунки выходил за пределы области горения более чем на 30 %, инициировалось перемещение и работа следующей форсунки (при выходе факела распыла первой форсунки за пределы области горения более чем на 60–70 % движение и распыление прекращались) и т. д. В момент, когда последняя форсунка завершала все описанные действия, процесс повторялся: осуществлялись распыл и перемещение форсунок в обратном направлении в соответствии с ранее описанной схемой. Данная процедура продолжалась до полного тушения модельного очага.

После завершения каждого отдельного эксперимента выполнялось сопоставление значений времен t_e с ранее установленными временами t_b ; при выполнении условия $t_e \ll t_b$ считалось, что тушение достигнуто. Дополнительно для всех проведенных экспериментов осуществлялся расчет объема воды V_e (л), затраченной на тушение модельного очага ЛГМ:

$$V_e = \mu_{w1} t_{p1} + \mu_{w2} t_{p2} + \dots + \mu_{wn} t_{pn},$$

где $\mu_{w1}, \mu_{w2}, \mu_{wn}$ — удельный расход воды соответствующей распылительной форсунки, л/с;

t_{p1}, t_{p2}, t_{pn} — суммарное время работы соответствующей распылительной форсунки в эксперименте, с.

Температура воды T_w (К) с использованием системы нагревательных камер 28 (см. рис. 1) варьировалась в экспериментах в диапазоне 300–350 К и регистрировалась хромель-копелевой термопарой типа L (диапазон измеряемых температур 233–573 К, допустимое отклонение $\Delta = 2,5$ К) в комплекте с цифровым измерителем температуры 5 (см. рис. 1). Максимальные случайные погрешности определения T_w составили ± 3 К.

Температура продуктов сгорания T_f (К) используемых модельных очагов контролировалась с помощью трех размещенных в окрестностях очага хромель-алюмелевых термопар 4 (диапазон измеряемых температур 273–1373 К, систематическая погрешность ± 3 К) и составляла в проведенных экспериментах 500–900 К. Максимальные случайные погрешности измерения T_f не превышали ± 30 К. Фиксация показаний термоэлектрических преобразователей осуществлялась многоканальным регистратором РМТ 59М 3, соединенным с рабочей станцией 1. Систематические погрешности измерения T_w и T_f не превышали 2,5 %.

Для определения и контроля параметров распыла (размеров и скоростей генерируемых форсунками капель, а также формы факела распыления) стенд оснащался комплектом устройств для реализации измерений посредством панорамных оптических методов “Particle Image Velocimetry” (PIV) [16, 17] и “Shadow Photography” (SP) [18, 19]. Их применение позволяло одновременно (не прибегая к дополнительным экспериментам) регистрировать скорости движения U_d и размеры R_d генерируемых капель. В используемую систему диагностики потоков входили следующие основные компоненты (см. рис. 1):

- две кросскорреляционные CCD-видеокамеры “IMPERX IGV B2020M” 6 и 7 (формат изображения 2048×2048 пикселей; кадровая частота не менее 1,5 Гц; минимальная задержка между двумя последовательными кадрами 5 мкс);
- двойной импульсный Nd:YAG лазер “QUANTEL EverGreen 70” 8 с генератором излучения 9 (длина волны 532 нм, максимальная энергия в импульсе 74 мДж, длительность импульса не более 12 нс, частота повторений не более 15 Гц);
- синхронизирующий процессор 10 (дискретизация сигналов не более 10 нс);
- диффузный экран 13 с закрепленным диффузором в комплекте с оптическим световодом 12;
- делитель лазерного излучения 11 с оптикой для формирования лазерного “ножа”.

Скорости U_d регистрировались перед началом проведения эксперимента с использованием пано-

рамного оптического метода “трассерной” визуализации потоков PIV [16, 17] (по аналогии с работами [11, 12]). При оценке размеров R_d использовался панорамный оптический метод теневой фотографии SP [18, 19]. Систематические погрешности определения R_d составили $\pm(7 \cdot 10^{-6})$ м, t_e и t_b — $\pm 0,5$ с, V_e — $\pm(5 \cdot 10^{-4})$ л; максимальные случайные погрешности определения скоростей капель U_d — 3,4 %.

Результаты и их обсуждение

Анализ полученных экспериментальных данных позволил установить особенности тушения модельных очагов, соответствующих низовому и верховому лесным пожарам. Для оценки возможности использования предлагаемой схемы тушения в реальных условиях (исходя из реальных высот пожаров) вычислялись эквивалентные высоты установки распылительных устройств над очагом лесного пожара. При подсчете эквивалентных высот использовались следующие данные: максимальная высота пламени низового лесного пожара 2,5 м, верхового — 15 м. Результаты пересчета параметров лабораторного эксперимента для соответствия реальным пожарам приведены в таблице.

На рис. 4 представлены зависимости времени t_e от высоты распыления (использовалась схема с перемещающимися над очагом горения распылительными форсунками) при тушении модельных очагов, соответствующих низовому лесному пожару. При проведении исследований опробованы различные комбинации распыла (см. рис. 4). В результате установлено, что наибольшие времена тушения (200–380 с) и объемы затраченной на тушение воды (0,108–0,182 л) соответствуют схеме, при которой используется одна распылительная форсунка с размерами генерируемых капель $R_d = 0,02 \div 0,12$ мм. Максимальные зна-

чения t_e и V_e при такой схеме тушения объясняются тем, что при $R_d < 0,15$ мм некоторая часть капельного потока все же подвергается развороту и последующему уносу восходящими продуктами сгорания модельного очага [11]. За счет этого воздействие на очаг пожара таким капельным потоком при наличии уноса капель (как правило, во время пламенного горения ЛГМ) малоэффективно.

Установлено, что значения времен t_e снижаются с ростом размеров генерируемых форсункой капель. Так, при $R_d = 0,08 \div 0,25$ мм значения t_e составили 148–210 с. Очевидно, такие результаты, помимо роста размера генерируемых капель (что способствует проникновению их в зону горения), связаны с увеличением расхода воды форсункой (плотности орошения модельного очага).

Минимальные значения t_e и V_e в проведенных экспериментах зафиксированы при тушении модельного очага посредством поочередного перемещения форсунок, генерирующих капли размером $R_d = 0,08 \div 0,25$ мм и $R_d = 0,02 \div 0,12$ мм. Времена тушения при таком способе распыла составили $t_e = 45 \div 110$ с, объемы воды $V_e = 0,03 \div 0,055$ л. Такой результат можно объяснить следующим образом. Капельный поток, генерируемый форсункой с более крупным распылом ($R_d = 0,08 \div 0,25$ мм), сбивает пламя за счет охлаждения поверхности горящего слоя ЛГМ: капли размером более 0,16–0,2 мм преодолевают сопротивление пламени и продуктов сгорания, достигают горячей поверхности ЛГМ и образуют пленку, отводя значительную долю тепла на испарение

Таблица параметров модельных очагов, соответствующих низовому и верховому лесным пожарам

Высота пламени, м, верхового/низового пожара		Высота сброса жидкости, м, при верховом/низовом пожаре		Скорость перемещения, м/с, при верховом/низовом пожаре	
модельного очага	реального пожара	на стенде	в условиях реального пожара	форсунок на стенде	авиасредства в условиях реального пожара
0,3/0,4	2,5/15	0,8	6,67/30,00	0,1	0,83/3,75
		0,9	7,50/33,75		
		1,0	8,33/37,50		
		1,1	9,17/41,25		
		1,2	10,00/45,00		
		1,3	10,83/48,75		
		1,4	11,67/52,50		

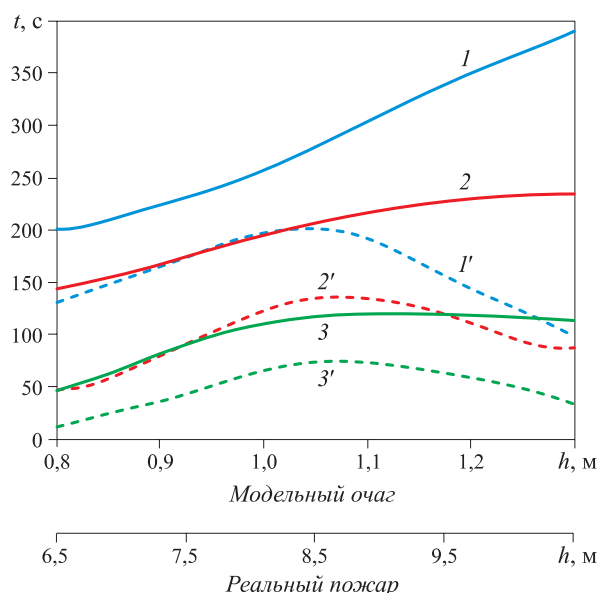


Рис. 4. Зависимости характерных времен тушения t_e модельных очагов, соответствующих низовому лесному пожару, от высоты установки распылительных форсунок h_p для случая полного тушения пламени (1–3) и его локализации (1'–3'): 1, 1' — $R_d = 0,02 \div 0,12$ мм; 2, 2' — $R_d = 0,08 \div 0,25$ мм; 3, 3' — $R_d = 0,08 \div 0,25$ мм → $R_d = 0,02 \div 0,12$ мм

воды (спустя примерно 15–20 с в окрестностях модельного очага зафиксировано снижение T_f на 50–80 К). Движущийся следом мелкодисперсный ($R_d = 0,02 \div 0,12$ мм) капельный поток активно испаряется в области пламени, а образовавшийся в результате этого водяной пар постепенно вытесняет из зоны горения окислитель и продукты газификации ЛГМ. С каждым последующим циклом движения форсунок эффект подавления пламени усиливается, что в итоге приводит к полному затуханию модельного очага.

Аналогичные закономерности установлены при тушении модельного очага, соответствующего верховому лесному пожару (рис. 5). Из рисунка видно, что при тушении модельного очага верхового пожара наибольшие времена (370–400 с) также соответствуют схеме, при которой используется только одна форсунка, генерирующая капельный поток с характерными размерами элементов $R_d = 0,02 \div 0,12$ мм; объемы затраченной на тушение воды при этом составили $V_e = 0,207 \div 0,23$ л. Наименьшие значения t_e и V_e (110–165 с и 0,135–0,204 л) характерны для схемы, при которой тушение достигалось путем поочередного перемещения форсунок, генерирующих капли размером $R_d = 0,12 \div 0,35$ мм и $R_d = 0,08 \div 0,25$ мм.

Необходимо выделить также еще одну общую особенность, зарегистрированную в проведенных экспериментах: при увеличении высоты установки распылительных форсунок в диапазоне 0,8–1,3 м наблюдался рост времен t_e в среднем от 45 до 100 % (см. рис. 4 и 5). При этом возрастали также объемы воды, затраченной на подавление горения модельных очагов. Такой результат можно объяснить двумя причинами. Во-первых, капли воды, двигаясь в области продуктов сгорания, постепенно теряли скорость за счет сопротивления встречного газового потока. Во-вторых, генерируемый форсунками капельный поток имел форму конуса, расширяющегося по мере удаления от точки распыла, что при постоянном удельном расходе воды приводило к уменьшению плотности орошения модельного очага. Данные особенности должны учитываться при прогнозировании времен и необходимых объемов воды, требуемых для тушения пожаров.

Следует также отметить, что, хотя задача испытаний заключалась в оценке эффективности использования такой схемы орошения при ликвидации больших верховых и низовых пожаров, очевидно, что аналогичная схема может быть также рекомендована к использованию при ликвидации возгораний в помещениях.

Можно выделить неочевидное преимущество такого подхода к тушению пожара в помещениях. Все известные оросительные устройства генерируют полидисперсный капельный поток с переменной по сечению струи дисперсностью (как правило, с неко-

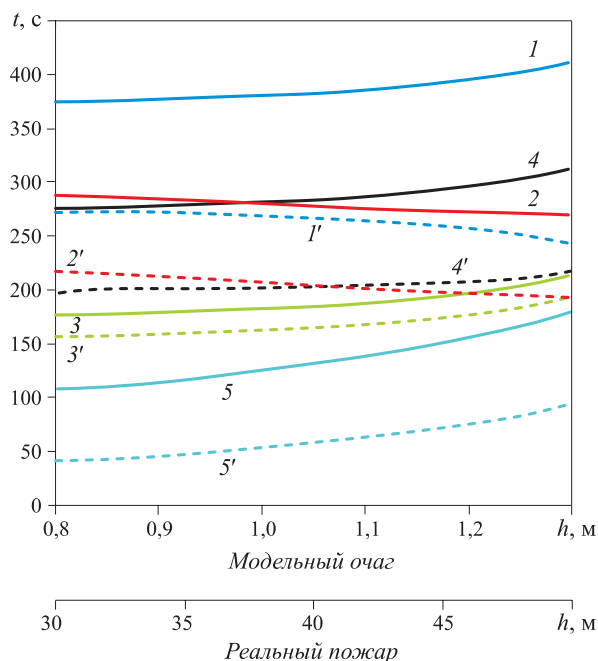


Рис. 5. Зависимости характерных времен тушения t_e модельных очагов, соответствующих верховому лесному пожару, от высоты установки распылительных форсунок h_p для случая полного тушения пламени (1–5) и его локализации (1'–5'): 1, 1' — $R_d = 0,02 \div 0,12$ мм; 2, 2' — $R_d = 0,08 \div 0,25$ мм; 3, 3' — $R_d = 0,12 \div 0,35$ мм; 4, 4' — $R_d = 0,08 \div 0,25$ мм → $R_d = 0,02 \div 0,12$ мм; 5, 5' — $R_d = 0,12 \div 0,35$ мм → $R_d = 0,08 \div 0,25$ мм

торым увеличением размеров капель при движении от центра струи к ее периферии). Это, в свою очередь, приводит к неравномерной плотности орошения. Данная проблема традиционно решается путем установки одновременно нескольких оросительных устройств. Однако это ведет к дополнительным затратам на комплектацию системы пожаротушения, поэтому при ликвидации возгорания с использованием традиционного подхода (стационарное размещение форсунок) для воздействия на разные участки пожара, как правило, применяется струя различной дисперсности. Вследствие этого при ликвидации возгораний в помещениях зачастую наблюдается затухание возгорания на одних участках из-за чрезмерного залива очага при продолжении горения на других участках. Данный факт подтверждается результатами экспериментов. Так, при средних размерах (радиусах) капель в потоке $R_d = 0,08 \div 0,25$ мм в процессе тушения очага, соответствующего низовому лесному пожару (см. рис. 3,а), посредством стационарно закрепленной над ним на высоте 0,8 м форсунки времена t_e в среднем составили 260–270 с. При постоянном поступательном перемещении форсунки над очагом на той же высоте $t_e = 145 \div 150$ с.

Полученные экспериментальные данные подтверждают целесообразность использования нескольких последовательных факелов орошения для тушения лесных и крупных городских пожаров.

Выводы

1. Проведена оценка эффективности тушения модельных очагов, соответствующих низовому и верховому лесным пожарам, с использованием системы, генерирующей распределенные во времени и пространстве капельные потоки воды.

2. Определены особенности механизма тушения модельных очагов и проанализировано влияние на данный процесс высоты установки распылительных форсунок.

3. Установлены оптимальные параметры распыления (размеры капель в потоке и комбинации рас-

пылительных форсунок), обеспечивающие наименьшие времена тушения модельных очагов и объемы затраченной на тушение воды.

4. Минимальные времена тушения модельного очага низового лесного пожара составили 45 с, объемы затраченной на тушение воды — 0,03 л. Для модельного очага верхового лесного пожара те же значения составили соответственно 110 с и 0,135 л.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2013 году : доклад МЧС России. — М. : ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2014. — 344 с.
2. Дешевых Ю. И. За год пожары уничтожают в России целый город со всей инфраструктурой // Безопасность. Достоверность. Информация. — 2010. — № 3(89). — С. 10–11.
3. Яницкий О. Н. Пожары 2010 г. в России: Экосоциологический анализ // Социологические исследования. — 2011. — № 3. — С. 4–12.
4. Доррер Г. А., Якимов С. П., Васильев С. А. Прогнозирование динамики распространения лесных пожаров в России // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2010. — Т. 16, № 4. — С. 65–67.
5. Москвиллин Е. А. Применение авиации для тушения лесных пожаров // Пожарная безопасность. — 2009. — № 1. — С. 89–92.
6. Коршунов Н. А. Авиационное тушение лесных пожаров: эффективность репортажей и эффективность технологий // Авиапанорама. — 2011. — № 4. — С. 10–13.
7. Соколов 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.
8. Сегаль М. Д. Использование тонкораспыленной воды для повышения противопожарной защиты кабельных сооружений АЭС // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2011. — № 4. — С. 61–64.
9. Саламов А. А. Современная система пожаротушения “водяной туман” высокого давления // Энергетик. — 2012. — № 3. — С. 16–18.
10. Тертигорьев В. Водяной туман как средство защиты объектов культуры // Алгоритм безопасности. — 2006. — № 5. — С. 18–20.
11. 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.
12. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование интегральных характеристик испарения пресной и соленой воды при движении через пламя // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2014. — № 2. — С. 18–23.
13. Стрижак П. А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 8. — С. 26–31.
14. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние структуры распыленной воды на температуру и концентрацию продуктов горения // Пожарная безопасность. — 2013. — № 4. — С. 47–53.
15. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон от 22.07.2008 № 123 // Собр. законодательства РФ. — 2008. — № 30 (ч. I), ст. 3579.
16. 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.
17. 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.

18. *Dehaeck S., Van Parys H., Hubin A., van Beeck J. P. A. J.* Laser marked shadowgraphy: a novel optical planar technique for the study of microbubbles and droplets // *Experiments in Fluids*. — 2009. — Vol. 47, No. 2. — P. 333–341. DOI: 10.1007/s00348-009-0668-8.
19. *Akhmetbekov Y. K., Alekseenko S. V., Dulin V. M., Markovich D. M., Pervunin K. S.* Planar fluorescence for round bubble imaging and its application for the study of an axisymmetric two-phase jet // *Experiments in Fluids*. — 2010. — Vol. 48, No. 4. — P. 615–629. DOI: 10.1007/s00348-009-0797-0.

Материал поступил в редакцию 22 февраля 2016 г.

Для цитирования: *Войтков И. С., Волков Р. С., Высокоморная О. В., Жданова А. О.* Экспериментальное исследование процессов тушения модельных очагов пожара распределенными во времени и пространстве каплевыми потоками воды // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2016. — Т. 25, № 6. — С. 56–65. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.56-65.

English

EXPERIMENTAL STUDY OF MODEL FIRE SEATS EXTINGUISHING BY THE DISTRIBUTED IN TIME AND SPACE WATER DROPLET FLOWS

VOYTKOV I. S., Postgraduate Student 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: i.voytkov@ges.tomsk.ru)

VOLKOV R. S., Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer 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)

VYSOKOMORNAYA O. V., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Postdoc 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: vysokomornaja@tpu.ru)

ZHDANOVA A. O., Assistant 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: zhdanovaao@tpu.ru)

ABSTRACT

In this paper the main attention is paid to a problem of increase of efficiency of major forest fires suppression. The main popular way of wildfires extinguishing — local dumping of water with use of aircraft was considered. The approach providing suppression of the fires by the distributed in time and space water flows is offered.

When carrying out researches the model fire seats corresponds (in temperature and height of a flame) to ground and crown forest fires were used. For model fire seats production the pine whetstones and the typical forest combustible materials making a basis of a forest laying are used. As means of suppression the spray nozzles generating a polydisperse droplet flow with droplet radius of 0.02–0.35 mm were applied. For continuous movement of nozzles over the model fire the special system was used. The system consisted of a set of coordinate mechanisms with adjustable parameters — acceleration and speed of movement.

Various ways of water spraying in a fire zone are considered. With using of the model fires (ground and crown forest fires) use of various combinations the spraying nozzles is tested. With use of high-speed video registration equipment and panoramic optical methods of flows diagnostics such as PIV and SP, the optimum parameters of dispersion (relative positioning and combinations of spray nozzles) providing smallest times of suppression of the model fire seat and the minimum volumes

of the water spent for suppression of a flame are revealed. For the model fire seats corresponding to ground forest fire, the minimum times of suppression were 45 sec, volumes of the spent water — 0.03 l, for the model fire seats corresponding to crown forest fire — 110 sec and 0.135 l. The sizes of sprayed water droplets corresponding to each scheme of dispersion necessary for effective fire extinguishing are determined. For the model fire seats corresponding to ground and crown forest fires these ranges were 0.02–0.25 and 0.08–0.35 mm, respectively. The expediency of the use of such systems in the liquidation of fires in rooms is proved.

Keywords: model fire seat; high-temperature gases; water droplets; extinguishing; evaporation.

REFERENCES

1. *O sostoyanii zashchity naseleniya i territoriy Rossiyskoy Federatsii ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogenogo kharaktera v 2013 godu*. Doklad MChS Rossii [The state report on the status of protection of population and territories of the Russian Federation from emergency situations of natural and technogenic character in 2013]. Moscow, All-Russian Research Institute on Problems of Civil Defense and Emergencies of Emercom of Russia Publ., 2014. 344 p.
2. Deshevyykh Yu. I. Za god pozhary unichtozhayut v Rossii tselyy gorod so vsey infrastrukturoy [Within a year fires destroy an entire city in Russia with all the infrastructure]. *Bezopasnost. Dostovernost. Informatsiya — Security. Reliability. Information*, 2010, no. 3(89), pp. 10–11.
3. Yanitskiy O. N. Pozhary 2010 g. v Rossii: ekosotsiologicheskiy analiz [Firebrands in Russia 2010: an ecosociological analysis]. *Sotsiologicheskiye issledovaniya — Sociological Studies*, 2011, no. 3, pp. 4–12.
4. Dorrer G. A., Yakimov S. P., Vasiliev S. A. Prognozirovaniye dinamiki rasprostraneniya lesnykh pozharov v Rossii [Forecasting spread of forest fires in Russia]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere — Problems of Technosphere Risk Management*, 2010, vol. 16, no. 4, pp. 65–67.
5. Moskvilin E. A. Primeneniye aviatsii dlya tusheniya lesnykh pozharov [Aviation usage for the suppression of forest fires]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2009, no. 1, pp. 89–92.
6. Korshunov N. A. Aviatsonnoye tusheniye lesnykh pozharov: effektivnost reportazhey i effektivnost tekhnologiy [Aviation extinguishing forest fires: efficiency reporting and efficiency technologies]. *Aviapanorama — Aviapanorama*, 2011, no. 4, pp. 10–13.
7. Sokovikov V. V., Tugov A. N., Grishin V. V., Kamyshev V. N. Avtomaticheskoye vodyanoye pozharotusheniye s primeneniye tonkoraspylennoy vody na elektrostantsiyakh [Automated water fire-fighting system with use of water spray at power plants]. *Energetik — Power and Electrical Engineering*, 2008, no. 6, pp. 37–38.
8. 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 — Safety and Emergencies Problems*, 2011, no. 4, pp. 61–64.
9. Salamov A. A. Sovremennaya sistema pozharotusheniya “vodyanoy tuman” vysokogo davleniya [Modern high pressure fire-fighting system “water mist”]. *Energetik — Power and Electrical Engineering*, 2012, no. 3, pp. 16–18.
10. Terpigorev 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.
11. 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 the initial parameters of spray water on the characteristics of its motion through a counter flow of high-temperature gases]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2014, vol. 84, no. 7, pp. 15–23.
12. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye integralnykh kharakteristik ispareniya presnoy i solenoy vody pri dvizhenii cherez plamya [Experimental investigation of integrated evaporation characteristics for fresh and salty water at moving through the flame]. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya — Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2014, no. 2, pp. 18–23.
13. Strizhak P. A. Chislennoye issledovaniye usloviy ispareniya sovokupnosti kapel vody pri dvizhenii v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Numerical investigation of evaporation conditions for set of water drops at the moving after high temperature gas mixture]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, no. 8, pp. 26–31.

14. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Vliyaniye struktury raspylennoy vody na temperaturu i kontsentratsiyu produktov goreniya [Influence of water spray structure on the temperature and concentration of combustion products]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2013, no. 4, pp. 47–53.
15. Technical regulations for fire safety requirements. Federal Law on 22.07.2008 No. 123. *Sobraniye zakonodatelstva RF — Collection of Laws of the Russian Federation*, 2008, no. 30 (part I), art. 3579 (in Russian).
16. 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.
17. 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.
18. Dehaeck S., Van Parys H., Hubin A., van Beeck J. P. A. J. Laser marked shadowgraphy: a novel optical planar technique for the study of microbubbles and droplets. *Experiments in Fluids*, 2009, vol. 47, no. 2, pp. 333–341. DOI: 10.1007/s00348-009-0668-8.
19. Akhmetbekov Y. K., Alekseenko S. V., Dulin V. M., Markovich D. M., Pervunin K. S. Planar fluorescence for round bubble imaging and its application for the study of an axisymmetric two-phase jet. *Experiments in Fluids*, 2010, vol. 48, no. 4, pp. 615–629. DOI: 10.1007/s00348-009-0797-0.

For citation: Voytkov I. S., Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Zhdanova A. O. Eksperimentalnoye issledovaniye protsessov tusheniya modelnykh ochagov pozhara raspredelennymi vo vremeni i prostanstve kapelnymi potokami vody [Experimental study of model fire seats extinguishing by the distributed in time and space water droplet flows]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 6, pp. 56–65. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.56-65.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу



Д. Г. Пронин, Д. А. Корольченко

ДЕЛЕНИЕ ЗДАНИЙ НА ПОЖАРНЫЕ ОТСЕКИ : учебное пособие.

— М. : Издательство "ПОЖНАУКА", 2014. — 40 с. : ил.

В учебном пособии изложены базовые основы, действующие требования и современные представления о целях, задачах и способах ограничения распространения пожара по зданиям и сооружениям путем их разделения на пожарные отсеки.

Пособие предназначено для студентов Московского государственного строительного университета. Оно может быть использовано также другими образовательными учреждениями и практическими работниками, занимающимися вопросами обеспечения пожарной безопасности.

121352, г. Москва, а/я 43; тел./факс: (495) 228-09-03; e-mail: info@fire-smi.ru