

Д. В. АНТОНОВ, студент, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: dva14@tpu.ru)

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

М. В. ЗАБЕЛИН, инженер кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: zabelinmv@tpu.ru)

М. В. ПИСКУНОВ, аспирант кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: piskunovmv@tpu.ru)

П. А. СТРИЖАК, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: pavelspa@tpu.ru)

УДК 536.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕН ПОДАВЛЕНИЯ ГОРЕНИЯ МОДЕЛЬНОГО ОЧАГА ЛЕСНОГО ПОЖАРА ТОНКОДИСПЕРСНЫМ КАПЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ

Проведены экспериментальные исследования процесса подавления горения модельного очага лесного пожара тонкодисперсным капельным водяным потоком с начальным размером капель 50–300 мкм и объемной концентрацией около 0,0012 м³ капель на 1 м³ газа. Применены средства высокоскоростной (до 6·10⁵ кадров в секунду) видеорегистрации и специализированное программное обеспечение "Тема Automotive". Выявлены условия, при которых происходит полная ликвидация очага горения. Определены оптимальные размеры капель воды, количество форсунок и их взаимное расположение, обеспечивающие эффективное тушение очага пожара (характерное время тушения около 220 с при минимальном расходе тушащего жидкостного состава около 4,5 л). Проведена экспериментальная оценка полноты испарения одиночных капель воды в условиях движения их через модельный очаг пожара. Показано хорошее соответствие полученных данных с результатами ранее проведенных лабораторных исследований.

Ключевые слова: пламя; высокотемпературные газы; распыленная вода; тушение; испытания; модельный очаг пожара.

DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.14-23

Введение

На территории Российской Федерации ежегодно регистрируются от 15 до 30 тыс. пожаров, охватывающих площадь от нескольких сотен до нескольких миллионов гектаров [1–3]. Многие лесные пожары возникают в труднодоступных и удаленных от водоемов местах. Этот фактор определяет потребность в уменьшении расходов жидкости, в частности воды, необходимой для эффективного пожаротушения.

Современные подходы к тушению пожаров, предусматривающие, например, применение тонкораспыленной воды [4–6], водяных завес [7–9], водяного тумана [10, 11], позволяют довольно существенно

минимизировать расход тушащей жидкости. В технологиях, описанных в [4–11], диапазон размеров капель воды, как правило, составляет 100–300 мкм. В реальных условиях объем тушащей жидкости, используемой в процессе пожаротушения даже с применением указанных выше подходов [4–11], остается весьма значительным. Это связано со сложностями оценки необходимого объема тушащей жидкости для ликвидации очагов того или иного вида пожара (особенно лесного).

Процессы тушения пожаров тонкодисперсными потоками воды характеризуются весьма сложными механизмами тепломассопереноса [12]. Основным

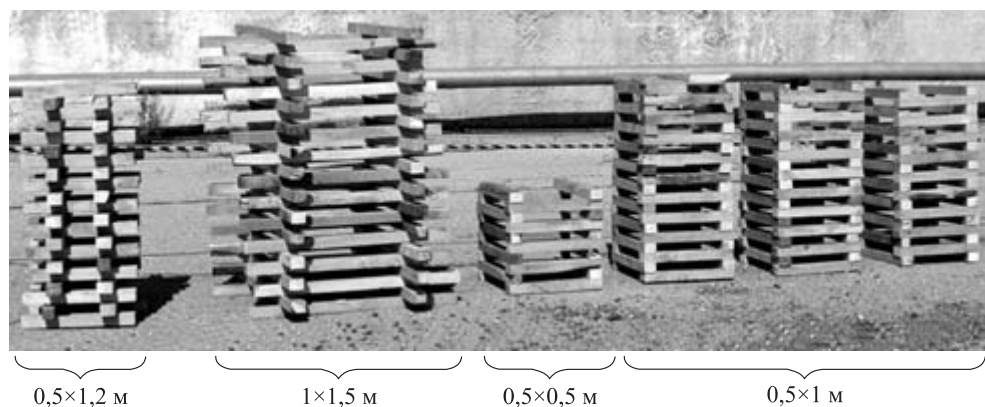


Рис. 1. Внешний вид модельных очагов пожара

доминирующим процессом, определяющим эффект тушения, является испарение капель воды в газовой фазе [13–17]. В лабораторных условиях установлено [13–17], что капли тонкораспыленной воды (размером до 50–70 мкм) в потоке высокотемпературных продуктов сгорания подвергаются торможению и уносу [15]. Капли же размером более 0,5 мм практически не испаряются в зоне горения протяженностью 1–2 м [13, 17]. Для эффективного пожаротушения одним из необходимых условий является интенсификация парообразования. Для этого оптимальные размеры капель целесообразно выбирать из диапазона от 100 до 500 мкм (в соответствии с основными заключениями экспериментов [13–17]).

Выполненные в последние годы теоретические [18, 19] и экспериментальные [20, 21] исследования позволили определить массу тушащей жидкости и характеристики испарения воды в зоне пламени в условиях, приближенных к реальным пожарам. Однако исследования [18–21] проводились в лабораторных условиях. В связи с этим большой интерес представляют соответствующие испытания на модельных очагах горения.

Каждый тип лесного пожара характеризуется соответствующим тепловыделением [22, 23]. Принято выделять низовой, верховой и подземный типы пожаров [22, 23]. Современные технологии позволяют моделировать конструкции — очаги, имитирующие указанные типы лесного пожара. Они выбираются из модельных очагов, как правило, по ГОСТ Р 51057–2001.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование типичных времен подавления горения модельного очага лесного пожара тонкодисперсным каплевым потоком в условиях полевых испытаний.

Методика экспериментальных исследований

Исследования включали два этапа:

1) определение времен подавления горения модельного очага лесного пожара;

2) изучение особенностей испарения капель воды на примере группы модельных очагов пожара.

В качестве модельных очагов (рис. 1) использовали конструкции, имитирующие верховые и низовые пожары в соответствии с ГОСТ Р 51057–2001. Модельные очаги собирали из брусков сосны сечением 50×50 и 100×100 мм и длиной от 0,5 до 1 м. Высота модельных очагов варьировалась от 0,5 до 1,5 м. Удельная мощность тепловыделения используемых модельных очагов составляла 4,05–18,4 МВт/м².

В ходе исследований по определению времен подавления горения модельного очага лесного пожара применяли испытательный комплекс, схема которого приведена на рис. 2. В качестве регистрацион-

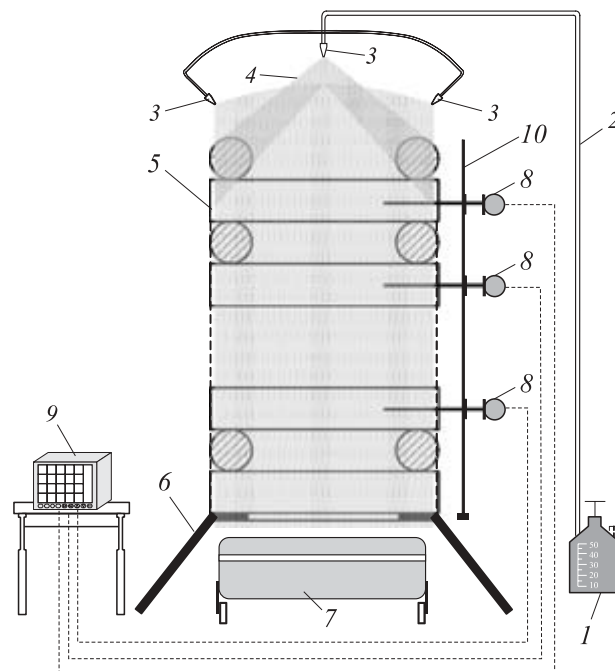


Рис. 2. Схема испытательного комплекса: 1 — баллон с водой; 2 — канал подачи воды; 3 — форсуночные распылительные устройства; 4 — капли распыленной воды (пароводяное облако); 5 — “тело” модельного очага пожара (деревянные бруски); 6 — металлическая площадка (основание конструкции); 7 — выдвижная тележка для улавливания жидкости; 8 — термодатчики; 9 — регистратор многоканальный технологический; 10 — защитная термоизоляционная стена

ной аппаратуры комплекса использовали многоканальное технологическое устройство РМТ-59М, электронный секундомер и электронные весы.

В соответствии с методикой проведения экспериментов последовательно выполняли следующие процедуры:

- наполняли баллон 1 предварительно подготовленной водой;
- создавали в баллоне 1 избыточное давление (около $2 \cdot 10^5$ Па);
- до начала огневых испытаний осуществляли настройку параметров распыла используемых форсунок 3 (по дисперсности капель, скорости подачи и углом факела распыла форсунок, полученным в лабораторных условиях [13–17]);
- осуществляли зажигание модельного очага пожара 5;
- по истечении 7–8 мин после зажигания модельного очага подавали воду из баллона 1 по каналу на вход форсуночного распылительного устройства 3, из которого производилось распыление воды во внутреннюю область модельного очага; регистрировали длительность процесса тушения с помощью секундомера;
- распыление воды в модельный очаг пожара осуществлялось до тех пор, пока не происходило угасание пламени; регистрировали время окончания процесса тушения (факт тушения фиксировался визуально, после чего подача воды прекращалась); согласно требованиям ГОСТ Р 51057–2001 тушение считалось достигнутым, если в течение 10 мин не происходило повторного воспламенения.

При движении потока распыленной воды сквозь модельный очаг возгорания формировалось пароводяное облако, которое испарялось и частично уносилось с высокотемпературными продуктами сгорания. Неиспарившаяся вода, пройдя через отверстие в металлической площадке, осаждалась на водостойкое брезентовое полотно, размещенное в выдвижной тележке для улавливания жидкости. Затем тележку выкатывали, вынимали из нее брезентовое полотно с осажденной водой и взвешивали ее. После этого проводили сравнение полученных результатов с количеством израсходованной при тушении модельного очага воды и вычисляли массу жидкости, потраченной непосредственно на ликвидацию горения модельного очага возгорания.

Было проведено несколько серий экспериментов для различных распылительных форсунок с варьируемыми расходом жидкости, скоростью движения капель и их размерами в потоке. В соответствии с требованиями ГОСТ Р 51057–2001 для каждого модельного очага проводили не менее трех серий экс-

периментов, после чего вычисляли средний расход воды на тушение и время ликвидации возгорания.

При изучении особенностей испарения капель воды в модельном очаге пожара применяли испытательный комплекс, схема которого приведена на рис. 3. Регистрационная и измерительная аппаратура испытательного комплекса (см. рис. 3) в целом аналогична аппаратуре, используемой при определении времени подавления горения модельного очага лесного пожара. Однако в отличие от комплекса, приведенного на рис. 2, при изучении особенностей испарения капель воды дополнительно использовалась высокоскоростная CMOS видеокамера “Phantom V411” 1 (формат изображения 1024×1024 пикселей, частота съемки до $6 \cdot 10^5$ кадров в секунду) и рабочая станция 2 (персональный компьютер).

Согласно методике проведения испытаний (см. рис. 3) последовательно выполняли следующие процедуры:

- осуществляли калибровку измерительной системы (выбирали настройки видеокамеры 1, определяли масштабный коэффициент);
- “тело” (деревянный каркас) модельного очага пожара 8 предварительно пропитывали горючей жидкостью, состоящей из смеси жидких углеводородов и парафинов, и зажигали;
- по истечении 2–3 мин после зажигания модельного очага в баллоне 4, предварительно наполненном водой, создавали избыточное давление, после чего воду из баллона по каналу 5 подавали на вход дозатора 6;

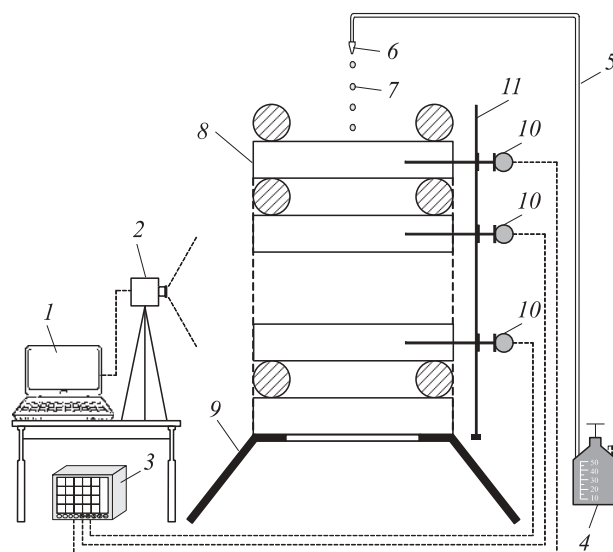


Рис. 3. Схема испытательного комплекса: 1 — высокоскоростная видеокамера; 2 — персональный компьютер; 3 — регистратор многоканальный технологический; 4 — баллон с водой; 5 — канал подачи воды; 6 — дозирующее устройство; 7 — капли воды; 8 — “тело” модельного очага пожара (деревянные бруски); 9 — металлическая площадка (основание конструкции); 10 — термометры; 11 — защитная термоизоляционная стена

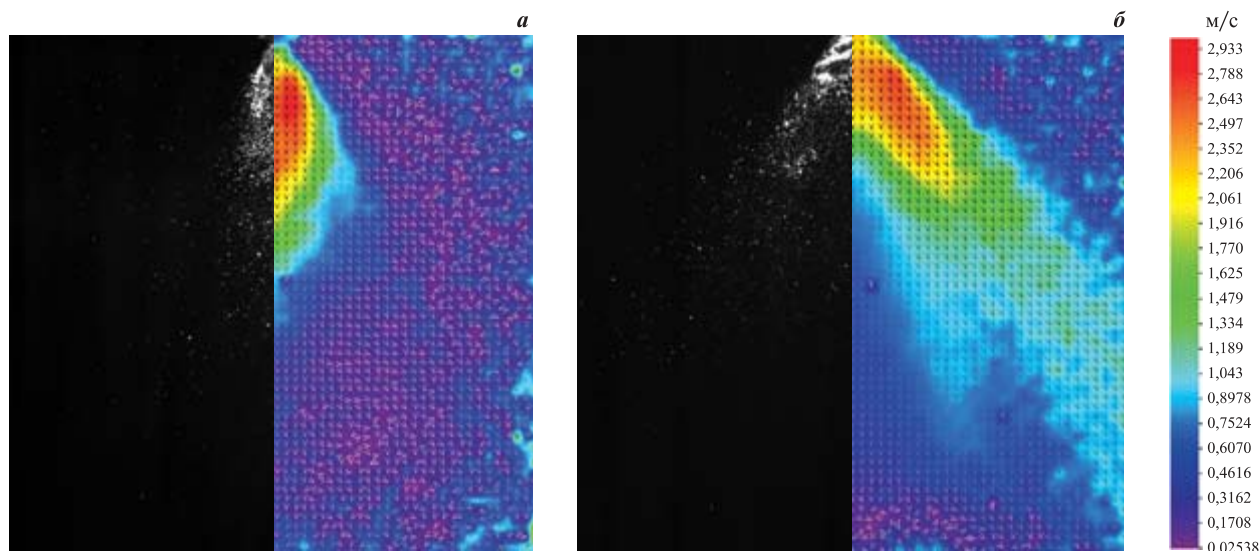


Рис. 4. Характерные видеogramмы и поля скоростей капельного потока при его генерации двумя типами форсунок: а — $d = 50\div 150$ мкм; б — $d = 150\div 300$ мкм

- при регулировании дозирующего устройства б подбирали оптимальные параметры (необходимая скорость генерации капель и их начальные размеры d_0);
- осуществляли запуск капель воды 7;
- с помощью высокоскоростной камеры 1 выполнялась процедура видеорегистрации процесса движения капель и изменения их размеров при прохождении через горящий очаг; отснятые данные передавались на персональный компьютер 2;
- осуществляли обработку данных с помощью программного комплекса “Tema Automotive” [24], в результате которой вычисляли средние размеры капель d , скорость их перемещения u_m и долю испарившейся воды.

Для каждого начального размера капель воды проводили не менее 10 экспериментов.

Размеры капель в расчетных областях видеок кадров (до и после зоны пламени) определяли по последовательному набору видеogramм, полученных через фиксированный временной интервал. Для каждой капли жидкости с заданным шагом по времени при помощи программного комплекса “Tema Automotive” определяли максимальные диаметры в горизонтальном и вертикальном направлениях. Затем после анализа всей видеозаписи движения капли ее диаметр усредняли: $d_{\text{кап}} = (d_1 + d_2 + \dots + d_n)/n$. Далее вычисляли соответствующие значения средних радиусов капель R_d .

После этого рассчитывали (по аналогии с работами [15–17]) параметр ΔR (%), характеризующий уменьшение размера капель при движении через высокотемпературную газовую область: $\Delta R = (R_d - R_d^*)/R_d \cdot 100$ % (где R_d , R_d^* — условный средний радиус капли соответственно на входе в зону высокотемпературных газов и на выходе из нее, мм).

Температуру пламени (продуктов сгорания) измеряли тремя хромель-алюмелевыми термопарами (диапазон измеряемых температур 273–1373 К, допустимое отклонение $\Delta = 3,3$ К) на разных по высоте уровнях испытательного комплекса.

Систематическая погрешность измерения средних размеров капель составила 0,03 мм, случайные погрешности не превышали 5,9 %. Максимальная погрешность измерения времени тушения не превышала 1 с.

Результаты и их обсуждение

В ходе проведенных в лабораторных условиях экспериментов [13–17] установлены основные параметры распыла воды (скорость движения капель, угол факела распыла) двумя типами форсунок, генерирующих водяной поток с размером капель 50–150 и 150–300 мкм. С применением панорамных оптических методов “Particle Image Velocimetry” (PIV) [25] и “Shadow Photography” (SP) [26] получены двухкомпонентные распределения скоростей (рис. 4) и гистограммы распределения размеров (рис. 5) капель тонкораспыленной воды для указанных типов форсунок. Методы PIV и SP относятся к классу бесконтактных и применяются для определения характеристик быстропротекающих процессов. Метод PIV базируется на определении мгновенного перемещения частиц потока, попавших в плоскость сечения лазерного ножа [25]. Метод SP основан на регистрации теневой фотографии объекта, имеющего коэффициент преломления, отличный от окружающей его среды [26].

Результаты исследований [12–19] показали, что тонкораспыленная вода представляет собой эффективное средство пожаротушения. Эффективность достигается за счет снижения требуемого для тушения

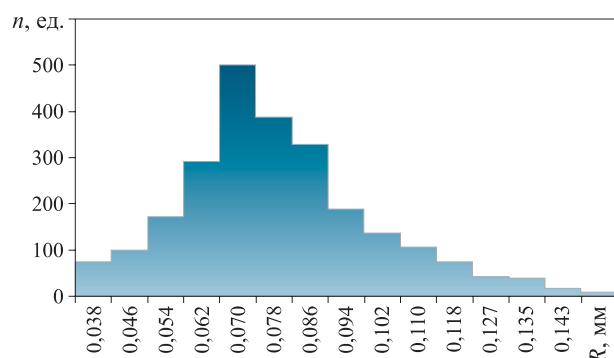


Рис. 5. Распределение размеров (радиусов) капель в распыленном потоке воды, генерируемом одним из типов форсунок

объема жидкости, уменьшения расходов на транспортировку ее на дальние расстояния, ее высокой огнетушащей способности. Наряду с тонкораспыленной водой, в экспериментах [12–19] рассмотрены также элементы генерации капель, соответствующие другим современным системам пожаротушения (водяной туман и водяная завеса с размером капель в потоке соответственно 5–50 и 300–1000 мкм). Представляло интерес в полевых условиях варьирование размеров и концентрации капель в потоке в соответствии с оптимальными диапазонами, выявленными по результатам экспериментов [12–19].

При испытании распылительных форсунок в полевых условиях в плане их огнетушащих возможностей использовали несколько идентичных модельных очагов пожара размером 1×1×1,5 м (см. рис. 1). На рис. 6 приведен внешний вид типичных модельных очагов пожара, используемых при проведении цикла полевых испытаний (до начала испытаний и после завершения процесса тушения соответственно).

Результаты испытаний по тушению модельных очагов возгораний с применением тонкодисперсного капельного потока приведены в таблице.

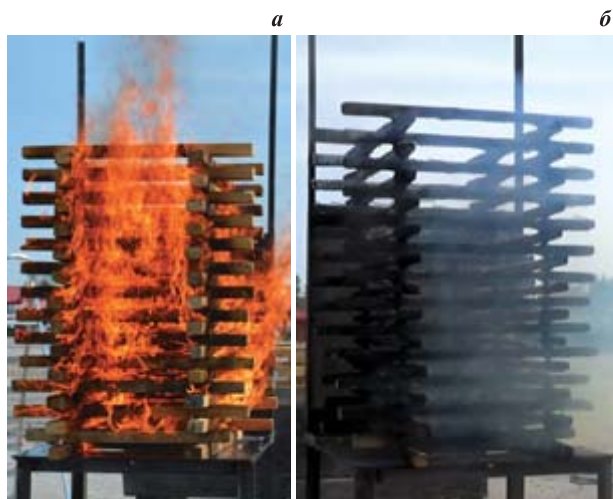


Рис. 6. Внешний вид модельного очага пожара в процессе горения (а) и после завершения процесса тушения (б)

Результаты испытаний по определению времен подавления горения пароводяным облаком

Размер капель в потоке, генерируемом форсункой, мкм	Количество одновременно используемых при тушении форсунок	Время подавления горения, с	Объем израсходованной на тушение воды, л
50–150	1	Тушение не достигнуто	–
50–150	3	Тушение не достигнуто	–
150–300	1	Тушение не достигнуто	–
150–300	3	219	4,5

Как видно из таблицы, прекращения процесса горения модельного очага удалось достичь только в случае одновременного включения трех форсунок, генерирующих полидисперсный капельный поток с размером капель 150–300 мкм. Такой результат можно объяснить несколькими причинами. Во-первых, мелкие (50–150 мкм) капли воды практически в полном объеме с легкостью подхватываются и уносятся восходящими продуктами сгорания, а также воздушными потоками (ветром). Это хорошо согласуется с результатами ранее выполненных лабораторных исследований по изучению закономерностей изменения траектории движения и уноса газопарокапельного потока продуктами сгорания жидких горючих веществ [16]. Во-вторых, образовавшееся в ходе тушения паровое облако также подвергалось уносу воздушным потоком (ветром). Использование в экспериментах распыленной струи с размером капель 150–300 мкм приводило к тому, что они проникали внутрь очага возгорания, практически не подвергаясь уносу, орошали горящую поверхность очага и охлаждали ее. Образовавшееся в ходе тушения паровое облако на какое-то время задерживалось внутри очага (и в его окрестностях). Расположение форсунок было выбрано таким образом, чтобы факелы распыла перекрывали друг друга, тем самым препятствуя уносу мелких капель и водяного пара. За счет этого достигалось значительное снижение температуры в окрестностях модельного очага и вытеснение окислителя из зоны пожара.

На рис. 7 приведены видеogramмы с изображениями капли воды после прохождения расстояния 1 м в воздушной (см. рис. 7,а) и высокотемпературной газовой (см. рис. 7,б) среде в условиях полевых испытаний. На рис. 8 представлены результаты обработки одной из снятых видеозаписей программным комплексом “Tema Automotive” [24].

При анализе результатов испытаний с применением описанных подходов (см. рис. 8) вычислены диапазоны изменения параметра ΔR для капель раз-

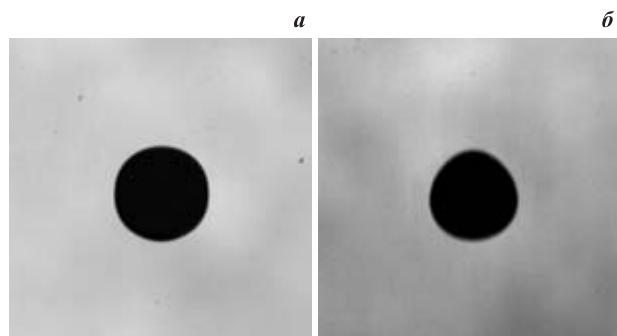


Рис. 7. Видеограммы с изображениями капли воды ($d_0 \approx 6,5$ мм) после прохождения расстояния 1 м в воздушной (а) и высокотемпературной газовой (б) среде

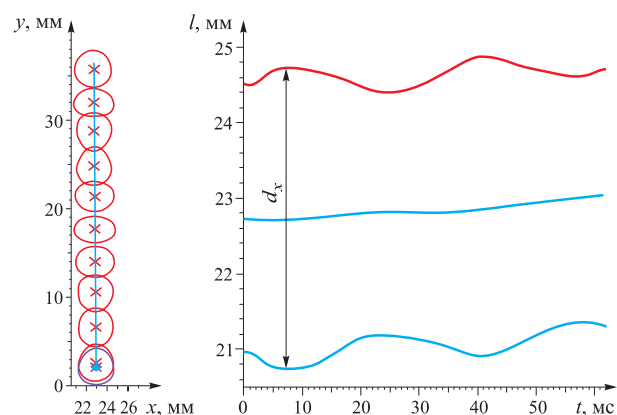


Рис. 8. Результаты обработки одной из снятых видеозаписей программным комплексом “Тема Automotive”: а — изменение формы капли при ее движении; б — изменение размеров капли по горизонтали в процессе движения ($T=0,0626$ с)

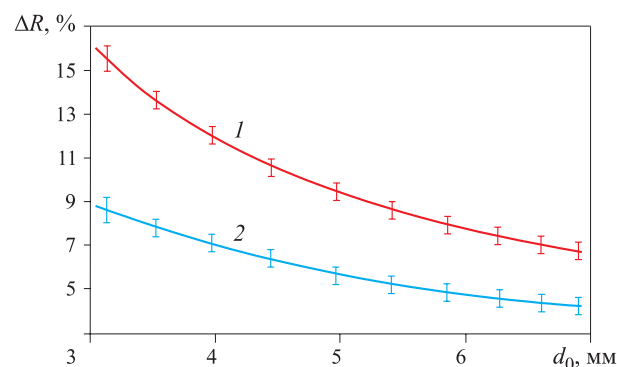


Рис. 9. Зависимость параметра ΔR от начального размера капель воды d_0 при прохождении ими расстояния около 1 м в высокотемпературных продуктах сгорания при испытаниях в полевых (1) и лабораторных (2) условиях

ных размеров. Зависимость, отражающая закономерности процесса испарения малых (3–7 мм) водяных капель, приведена на рис. 9. Установлено, что с ростом начальных размеров капель параметр ΔR нелинейно уменьшается. В частности, для капель с начальным диаметром $d_0 \approx 4$ мм значение параметра ΔR составляло около 12 %, при $d_0 \approx 5$ мм — 9,5 % и при $d_0 \approx 6$ мм — 8 %.

Вид и характер полученной кривой в целом достаточно хорошо коррелируют с результатами ранее проведенных лабораторных исследований [12–19]. Однако при проведении экспериментов в лабораторных условиях значения параметра ΔR для капель, например, с $d_0 \approx 6$ мм не превышали, как правило, 3–4 %, а для капель с $d_0 \approx 3$ мм — 9–11 %. Более высокие значения параметра ΔR по результатам полевых испытаний, скорее всего, обусловлены повышением начальной температуры воды до 315–320 К за счет высоких температур в окрестности модельного очага пожара, что вызвало нагрев медного канала, по которому вода подавалась в область пламени (имелся непосредственный контакт пламени с выводом канала). Тем не менее полевые испытания показали, что результаты исследований в лабораторных условиях [12–19] хорошо коррелируют с данными, полученными при использовании для создания высокотемпературной газовой среды модельных очагов лесных пожаров.

Испытания одиночных капель воды в полевых условиях были проведены с использованием группы модельных очагов пожара (см. рис. 1). Установлено, что значения интегрального параметра ΔR для всех сопоставимых по высоте очагов пожара были близки (отклонения не превышали 2–3 %). Этот результат свидетельствует о том, что заключения по результатам проведенных экспериментов справедливы для разных конструкций модельных очагов возгораний. Это, в свою очередь, позволяет интерполировать сформулированные представления на разные условия тушения лесных пожаров.

Выводы

1. Разработана методика экспериментальных испытаний, связанных с исследованием процессов испарения и изменения траектории движения капель тонкораспыленной воды в потоке высокотемпературных газов, и проведены полевые испытания в соответствии с ГОСТ Р 51057–2001 с использованием двух типов форсунок в условиях ветровой нагрузки.

2. Установлены оптимальные размеры капель воды (150–300 мкм), количество форсунок (3–5), необходимых для эффективного тушения очага возгорания размером $1 \times 1,5$ м, а также их взаимное расположение. Капли воды размером 150–300 мкм проникали внутрь очага возгорания, практически не подвергаясь уносу, орошали горящую поверхность очага и охлаждали ее. За счет этого достигалось значительное снижение температуры в окрестностях модельного очага и вытеснение окислителя из зоны пожара.

3. Время подавления очага возгорания составило около 220 с, объем израсходованной на тушение

жидкости — 4,5 л. Для очагов возгорания с характерным размером $1 \times 1 \times 1,5$ м и мощностью тепловыделения 3,84 МВт этот результат можно считать вполне удовлетворительным.

4. При прохождении каплями воды расстояния около 1 м в высокотемпературных продуктах сгорания (модельного очага) с ростом их начальных размеров параметр ΔR нелинейно уменьшается: для капель с начальным диаметром $d_0 \approx 4$ мм значение параметра ΔR составляло около 12 %, для капель с $d_0 \approx 5$ мм — 9,5 %, для капель с $d_0 \approx 6$ мм — 8 %.

Такой результат в целом достаточно хорошо коррелирует с результатами ранее проведенных лабораторных исследований.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект 14-08-00057). Анализ влияния характерного размера капель распыленных потоков на условия их испарения выполнен при финансовой поддержке стипендии Президента РФ для молодых ученых (СП-2290. 2015.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дешевых Ю. И. За год пожары уничтожают в России целый город со всей инфраструктурой // Безопасность. Достоверность. Информация. — 2010. — № 3(89). — С. 10–11.
2. Яницкий О. Н. Пожары 2010 г. в России: экосоциологический анализ // Социологические исследования. — 2011. — № 3. — С. 4–12.
3. 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.
4. Корольченко Д. А., Громовой В. Ю., Ворогушин О. О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Вестник МГСУ. — 2011. — № 1-2. — С. 331–335.
5. 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.
6. Сегаль М. Д. Использование тонкораспыленной воды для повышения противопожарной защиты кабельных сооружений АЭС // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2011. — № 4. — С. 61–64.
7. Виноградов А. Г. Учет спектрального состава теплового излучения при расчете коэффициента пропускания капли воды // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 9. — С. 64–73.
8. Виноградов А. Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 1. — С. 45–56.
9. Виноградов А. Г. Применение теории затопленных струй к расчету параметров водяных завес // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 5. — С. 76–87.
10. Саламов А. А. Современная система пожаротушения “водяной туман” высокого давления // Энергетик. — 2012. — № 3. — С. 16–18.
11. Терпигорьев В. Водяной туман как средство защиты объектов культуры // Алгоритм безопасности. — 2006. — № 5. — С. 18–20.
12. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Numerical investigation of the influence of convection in a mixture of combustion products on the integral characteristics of the evaporation of a finely atomized water drop // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2014. — Vol. 87, No. 1. — P. 103–111. DOI: 10.1007/s10891-014-0990-8.
13. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Испарение одиночных капель и потока распыленной жидкости при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Теплофизика высоких температур. — 2014. — Т. 52, № 4. — С. 597–604.
14. Волков Р. С., Жданова А. О., Стрижак П. А., Кузнецов А. Е., Москвитин Е. А. О роли распылительных устройств при тушении пожаров // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 3. — С. 42–60.
15. Стрижак П. А., Волков Р. С., Забелин М. В., Курисько А. С. Особенности испарения одиночных и полидисперсного потока капель воды в высокотемпературной газовой среде // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 9-2. — С. 307–311.
16. Волков Р. С., Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное определение размеров капель водяного потока, уносимых высокотемпературными газами // Теплоэнергетика. — 2015. — № 8. — С. 50–56. DOI: 10.1134/S0040363615080093.
17. 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.

18. 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.
19. 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.
20. Корольченко Д. А. Изменение характеристик горения горючей жидкости при тушении тонкораспыленной водой // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 5. — С. 79–80.
21. Душкин А. Л., Ловчинский С. Е. Взаимодействие пламени горючей жидкости с тонкораспыленной водой // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 11. — С. 53–55.
22. Гришин А. М., Лобода Е. Л., Ерохонова А. А., Таныгина М. Н. Экспериментальное исследование критических условий перехода низового лесного пожара в верховой // Пожарная безопасность. — 2010. — № 1. — С. 120–125.
23. Перминов В. А., Алексеев Н. А., Кырмакова О. С. Математическое моделирование перехода низового лесного пожара в верховой // Контроль. Диагностика. — 2012. — № 13. — С. 179–182.
24. Janiszewski J. Measurement procedure of ring motion with the use of high-speed camera during electromagnetic expansion // Metrology and Measurement Systems. — 2012. — Vol. 19, No. 4. — P. 797–804.
25. Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry // Measurement Science and Technology. — 1997. — Vol. 8, Issue 12. — P. 1379–1392. DOI: 10.1088/0957-0233/8/12/002.
26. 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 2 сентября 2015 г.

Для цитирования: Антонов Д. В., Волков Р. С., Забелин М. В., Пискунов М. В., Стрижак П. А. Экспериментальное определение времен подавления горения модельного очага лесного пожара тонкодисперсным капельным потоком // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 11. — С. 14–23. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.14-23.

English

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE SUPPRESSION BURNING MODEL FOREST FIRES OF FINE DROPLET FLOW

ANTONOV D. V., Student, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: dva14@tpu.ru)

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

ZABELIN M. V., Engineer 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: zabelinmv@tpu.ru)

PISKUNOV M. V., Postgraduate Student, 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: piskunovmv@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

In this paper the main attention is paid to a problem of increase of efficiency of fire extinguishing mechanisms with using sprayed water, in particular, to studying of extinguishment times of burning of the model forest fire with use of a fine droplet flow.

The optimum sizes of sprayed water droplets, quantity of nozzles and their relative positioning which are required for the effective fire extinguishing are revealed with use of high-speed video registration equipment and panoramic optical methods. The reasons of emergence of the turning phenomenon of sprayed water droplets at extinguishment of ignitions are analyzed. The minimum extinguishment times of burning are defined. Comparison of researches results of single water droplets evaporation processes in the conditions of field tests (with use of model fire group) and when carrying out similar experiments in laboratory was executed. Rather satisfactory compliance of experimental data on liquid evaporation rates is revealed.

It is established that systematic errors of measurement of the water droplet sizes were no more than 0.03 mm, random — no more than 5.9 %. The maximum measurement error of extinguishment times didn't exceed 1 sec.

Keywords: flame; high temperature; gases; water spray; extinguishment; checkout; model fire.

REFERENCES

1. 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.
2. Yanitsky O. N. Pozhary 2010 g. v Rossii: ekosotsiologicheskii analiz [Firebrands in Russia 2010: an ecosociological analysis]. *Sotsiologicheskkiye issledovaniya — Sociological Studies*, 2011, no. 3, pp. 4–12.
3. Dorrer G. A., Yakimov S. P., Vasilyev 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.
4. 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]. *Vestnik MGSU — Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2011, no. 1-2, pp. 331–335.
5. Sokovikov V. V., Tugov A. N., Grishin V. V., Kamyshev V. N. Avtomaticheskoye vodyanoye pozharotusheniye s primeneniym tonkoraspylennoy vody na elektrostantsiyakh [Automated water fire-fighting system using water spray on power plants]. *Energetik — Power & Electrical Engineering*, 2008, no. 6, pp. 37–38.
6. Segal M. D. Ispolzovaniye tonkoraspylennoy vody dlya povysheniya protivopozharnoy zashchity kabelnykh sooruzheniy AES [Usage of water mist to increase the fire precautions of cable structures at Atomic Power Stations]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy — Problems of Safety and Emergency Situations*, 2011, no. 4, pp. 61–64.
7. 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]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 9, pp. 64–73.
8. Vinogradov A. G. Metodika rascheta ekraniruyushchikh svoystv vodyanykh zaves [Calculation method of water curtain shielding properties]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 45–56.
9. Vinogradov A. G. Primeneniye teorii zatoplenykh struy k raschetu parametrov vodyanykh zaves [Application of the submerged jet theory to calculation of water curtain parameters]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 5, pp. 76–87.
10. Salamov A. A. Sovremennaya sistema pozharotusheniya “vodyanoy tuman” vysokogo davleniya [Modern system of firefighting “water fog” of high-pressure]. *Energetik — Power & Electrical Engineering*, 2012, no. 3, pp. 16–18.
11. Terpigoryev V. Vodyanoy tuman kak sredstvo zashchity obyektov kultury [Water mist as a means of cultural objects protection]. *Algoritmy bezopasnosti — Security Algorithm*, 2006, no. 5, pp. 18–20.
12. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Numerical investigation of the influence of convection in a mixture of combustion products on the integral characteristics of the evaporation of a finely atomized water drop. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 1, pp. 103–111. DOI: 10.1007/s10891-014-0990-8.

13. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Evaporation of single droplets and dispersed liquid flow in motion through high-temperature combustion products. *High Temperature*, 2014, vol. 52, issue 4, pp. 568–575. DOI: 10.1134/S0018151X14030183.
14. Volkov R. S., Zhdanova A. O., Strizhak P. A., Kuznetsov A. E., Moskvilin E. A. O roli raspylitelnykh ustroystv pri tushenii pozharov [About the role of atomizing devices under the extinguishing of fires]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 3, pp. 42–60.
15. Strizhak P. A., Volkov R. S., Zabelin M. V., Kurisko A. S. Osobennosti ispareniya odinochnykh i poli-dispersnogo potoka kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Features of single and polydisperse flow water droplets evaporarion in high temperature gas area]. *Fundamentalnyye issledovaniya — Fundamental Research*, 2014, no. 9-2, pp. 307–311.
16. Volkov R. S., Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye opredeleniye raz-merov kapel vodyanogo potoka, unosimyykh vysokotemperaturnymi gazami [Experimental determi-nation of the droplet size in water flow, entrained by high-temperature gases]. *Teploenergetika — Thermal Engineering*, 2015, no. 8, pp. 50–56. DOI: 10.1134/S0040363615080093.
17. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye integralnykh kharakte-ristik 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 — Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2014, no. 2, pp. 18–23.
18. 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 place-ments]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 5, pp. 74–78.
19. 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]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 2, pp. 9–17.
20. Korolchenko D. A. Izmeneniye kharakteristik goreniya goryuchey zhidkosti pri tushenii tonkoraspy-lennoy vodoy [Changes in burning characteristics of the combustion liquid during suppression by finely atomized water]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 5, pp. 79–80.
21. Dushkin A. L., Lovchinskiy S. E. Vzaimodeystviye plameni goryuchey zhidkosti s tonkoraspylennoy vodoy [Combustible liquid flame and water mist interaction]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 11, pp. 53–55.
22. Grishin A. M., Loboda E. L., Yerokhonova A. A., Tanygina M. N. Eksperimentalnoye issledovaniye kriticheskikh usloviy perekhoda nizovogo lesnogo pozhara v verkhovoy [Exrerimental research of crit-ical transition conditions of surface forest fire to crown forest fire]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2010, no. 1, pp. 120–125.
23. Perminov V. A., Alexeev N. A., Kyrmakova O. S. Matematicheskoye modelirovaniye perekhoda nizo-vogo lesnogo pozhara v verkhovoy [Mathematical modeling of transition surface forest fire to the crown forest fire]. *Kontrol. Diagnostika — Testing. Diagnostics*, 2012, no. 13, pp. 179–182.
24. Janiszewski J. Measurement procedure of ring motion with the use of high speed camera during electro-magnetic expansion. *Metrology and Measurement Systems*, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 797–804.
25. Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry. *Measurement Science and Techno-logy*, 1997, vol. 8, issue 12, pp. 1379–1392. DOI: 10.1088/0957-0233/8/12/002.
26. Akhmetbekov Y. K., Alekseenko S. V., Dulin V. M., Markovich D. M., Pervunin K. S. Planar fluores-cence 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: Antonov D. V., Volkov R. S., Zabelin M. V., Piskunov M. V., Strizhak P. A. Eksperimen-talnoye opredeleniye vremen podavleniya goreniya modelnogo ochaga lesnogo pozhara tonkodis-persnym kapelnym potokom [Experimental determination of the suppression burning model forest fires of fine droplet flow]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 11, pp. 14–23. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.14-23.