

**А. О. ЖДАНОВА**, аспирант кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: zhdanovaao@tpu.ru)

**Г. В. КУЗНЕЦОВ**, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и промышленной теплотехники, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: elf@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)

**И. Р. ХАСАНОВ**, начальник научно-исследовательского центра, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143912, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: irhas@rambler.ru)

**Д. В. ФЕДОТКИН**, канд. техн. наук, заместитель начальника отдела, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143912, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: fdv982@mail.ru)

УДК 536.4

## О ВОЗМОЖНОСТИ ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ И ТОРФЯНЫХ ПОЖАРОВ ПОЛИДИСПЕРСНЫМИ ВОДЯНЫМИ ПОТОКАМИ

Проведен анализ основных современных методов тушения лесных и торфяных пожаров. Выделены особенности расходования тушащих средств в процессе подавления химического реагирования лесных горючих материалов, а также торфа. Сформулированы направления целесообразного (с точки зрения ресурсо- и энергоэффективности) развития методов тушения лесных и торфяных пожаров с применением полидисперсных водяных потоков. Выполнена численная оценка возможной эффективности применения полидисперсных водяных потоков.

**Ключевые слова:** лесные и торфяные пожары; подавление химического реагирования; методы тушения; полидисперсные пароводяные потоки.

### Введение

Негативные экономические и социальные последствия лесных и торфяных пожаров во всем мире велики. Следует отметить длительность ликвидации и большие площади таких пожаров на территории Российской Федерации в последние годы [1–3]. Лесной массив России составляет пятую часть лесов мира, а запасы торфа — 37 % относительно мировых [4]. Таким образом, лесные и торфяные пожары оказывают негативное влияние на качество среды обитания, нарушают состояние лесов и торфяников [4]. В обнародованном центром ФОБОС рейтинге [3] наиболее сильных природных потрясений 2010 г. российские лесные пожары признаны одним из самых опасных стихийных бедствий (рис. 1). Эти индикаторы еще раз иллюстрируют высокую значимость проблемы тушения лесных пожаров.

Торфяные пожары (рис. 2) также наносят большой вред экономике, окружающей среде и здоровью человека [5]. В пламени таких пожаров сгорает почти в 10 раз больше биологической массы, чем при

лесных пожарах [5]. При этом выделяется значительно большее количество токсичных газов (метана, углекислого и угарного газов, формальдегида, оксидов азота, ароматических углеводородов, бензапирена и др.). В то же время торфяные пожары распространяются на значительно меньшие площади, чем лесные [5]. Тяжелые последствия лесных и торфяных пожаров требуют особого внимания к проблемам противопожарной охраны лесов и торфяников, а также разработки новых ресурсоэффективных способов и методов ликвидации таких пожаров [5].

### Причины лесных и торфяных пожаров

Одной из наиболее типичных причин возникновения лесных и торфяных пожаров служат “благоприятные” для возгораний метеорологические (или климатические) условия [6]. Способствует развитию таких стихийных бедствий высокая температура воздуха, сильный ветер, отсутствие осадков, низкое содержание влаги в почвенном и подпочвенных



Рис. 1. Фрагмент лесного пожара в центральной части России (2010 г.)



Рис. 2. Фрагмент торфяного пожара в Тверской области (07–12.08.2014 г.)

слоях [6]. В то же время основными причинами возникновения лесных пожаров являются высокотемпературные источники нагрева [7–9]. Как правило, это источники природного характера: удар молнии, фокусированное каплями воды или смолы солнечное излучение и др. [7]. Вероятность возникновения природных источников пожаров варьируется в среднем от 0,1 до 0,5 % [7].

Известно, что длительная засуха приводит к осушению верхнего слоя торфа до относительной влажности 20–50 % [5]. При таком содержании влаги может происходить его возгорание с последующим химическим реагированием горючего и окислителя (воздуха) в нижних слоях торфа (несмотря на их влажность, как правило, около 50 %). Торфяные пожары возникают чаще всего от очаговых источников тепла (“глеющая кочка”, “гнилушка” [10, 11] и др.), остающихся после прохождения низового пожара. В результате происходит воспламенение торфа и “заглубление” очага горения [10, 11].

Возгорание торфа может происходить также, например, вследствие его саморазогрева при периоди-

ческих высокочастотных (суточных) и низкочастотных (сезонных) колебаниях температуры воздуха [12]. Установлено [12], что на период индукции при самовоспламенении торфа основное влияние оказывают сезонные (годовые) колебания температуры.

Одним из основных источников лесных и торфяных пожаров является и антропогенная деятельность человека, в частности неосторожное обращение с огнем [6, 7, 9]. Количественная оценка человеческого фактора пока затруднена [7]. Так, например, причиной возгорания торфа могут быть непотушенные костры, искры, разносимые ветром на расстояние до 50 м и более [5].

Законодательная база управления лесами и лесопользования в России уже длительное время находится в стадии реформирования [3, 13, 14]. Принято считать [13], что недоработки в лесном законодательстве также могут стать причиной возникновения пожаров. На мониторинг, профилактику и борьбу с природными пожарами в России затрачивается недостаточно (по оценкам автора [13]) финансовых средств. На охрану лесов от пожаров в 2010 г. было выделено всего 2,2 млн. руб. [13], тогда как, например, в Канаде ежегодно на предотвращение лесных пожаров тратится не менее 1 млрд. долл. [13]. Предотвращение пожаров является неотъемлемой частью борьбы с этими стихийными бедствиями. Недостаток финансовых средств на охрану лесов от пожаров влечет за собой непоправимые последствия [13].

### Методы тушения лесных и торфяных пожаров

Проблеме ликвидации лесных пожаров уже давно уделяется большое внимание [15–20]. Известны результаты экспериментальных исследований [15, 17–19] процессов горения лесных горючих материалов (ЛГМ) и моделирования низовых лесных и степных пожаров [16, 19, 20]. Распространение пламени по поверхности ЛГМ представляется как непрерывно повторяющийся процесс воспламенения образовавшихся горючих летучих продуктов разложения древесины [21]. Считается [21], что при пламенном горении токсичность продуктов сгорания древесины уменьшается. Установлено [21], что в режиме тления (рис. 3) в диапазоне температур 720–820 К токсичность продуктов сгорания образцов древесины самая высокая: так, концентрация  $\text{HCl}_{50}$  находится в пределах 20–33 г/м<sup>3</sup>. Все разновидности древесины в этих условиях проявляют себя как высокоопасные по токсичности продуктов сгорания [22] и по ГОСТ 12.1.044–89 относятся к группе ТЗ [22, 23]. Циклы выполненных исследований термического разложения лесных горючих материалов [24–32] позволили установить кинетические параметры их пиролиза, а также определить его основные стадии (выход воды,



Рис. 3. Типичная видеограмма процесса тления древесины

выход летучих продуктов разложения ЛГМ, гетерогенная реакция окисления углеродистого остатка).

Полная ликвидация очага горения [15, 33] в условиях типичного лесного пожара возможна только при прекращении реакции термического разложения в приповерхностных слоях ЛГМ. Решение задачи подавления реакции термического разложения лесных горючих материалов как элемента борьбы с лесными пожарами способствует активному развитию аэрозольных технологий [16, 34–38], таких как водяной туман, тонкораспыленная вода, паровая завеса и др. (рис. 4). Можно отметить широкий спектр работ, направленных на оценку эффективности пожаротушения тонкораспыленной водой с применением авиационных методов [39–43]. Исследованы струи тонкораспыленной воды при жидкостном и газожидкостном способах распыления [41]. Проведен анализ влияния дисперсности капель воды на эффективность пожаротушения [41]. Сформулированы рекомендации [23, 41] по способам формирования высокодисперсных капельных смесей и их транспортирования в очаг горения. В то же время можно подчеркнуть [23], что для создания установок объемного пожаротушения с использованием тонкораспыленной воды недостаточно нормативной, научной и информационной базы.



Рис. 4. Тушение торфяников в Тверской обл. с помощью самолета Ил-76МД (2014 г.)

Важно подчеркнуть, что применение способа полидисперсного распыления [44] позволяет повысить “огнетушащую” способность воды за счет оптимального соотношения мелких и крупных капель в потоке, направляемом в очаг горения. Повышению огнетушащей способности воды способствует также добавление в нее веществ щелочной природы [44].

Известен способ тушения пожаров [45], при реализации которого жидкость подают в виде газокapельной струи, получаемой путем ее диспергирования в газовом потоке и последующего ускорения двухфазного потока в газодинамическом сопле. Применение данного способа [46] предусматривает подачу огнетушащего средства (комбинированной струи пены низкой кратности — от 7 до 20 и средней — от 20 до 70) в зону пожара.

Можно также отметить способ [47], обеспечивающий тушение лесных пожаров огнетушащим веществом (ОТВ) с относительно небольшим количеством воды. В такой состав, помимо воды, входит тонкоизмельченная шихта легкоплавкого стекла в концентрации 0,0001–10 % в виде раствора или взвеси [47].

Известен и другой способ тушения лесных массивов и торфяников [48]. Он реализуется при эксплуатации водного состава, который включает молотые глину и асбест, хлорид натрия и воду. Сочетание данных компонентов в определенном соотношении обеспечивает получение эффективного, недорогого и технологичного состава для подавления горения.

Установлено [49–51], что древесина и торф значительно различаются по структуре строения, плотности, химическому составу, теплофизическим и реакционным свойствам. Для тушения торфяных пожаров необходимо существенно большее (по сравнению с лесными) количество воды: на 1 м<sup>3</sup> торфа — около 1 м<sup>3</sup> воды [5]. При этом торф поглощает только 5–8 % жидкости и быстро высыхает, что приводит во многих случаях к новому возгоранию [5]. В связи с этим для понижения поверхностного натяжения воды и повышения смачиваемости поверхности торфа в воду вводят поверхностно-активные вещества (ПАВ) [5, 52]. Для каждого типа торфа существуют свои оптимальные составы ПАВ [52–56]. В последнее время в качестве ПАВ (до 0,3 %) активно применяют: сульфанол НП, пенообразователи ОП-7 и ОП-10 [5]. Известно также, что использование для тушения пожаров 1–3 %-ных растворов карбонатов и бикарбонатов натрия позволяет повысить смачиваемость торфа в 2–3 раза [57].

Другим видом обработки торфа для предотвращения его самовозгорания или зажигания является применение растворов пленкообразователей, затрудняющих доступ воздуха к его поверхности [58]. Эти функции может выполнять глинистая пульпа, обра-

зующаяся в процессе мелиорации торфяно-болотных экосистем. В состав глинистой пленкообразующей композиции предложено вводить добавки хлорида кальция, ингибирующие горение торфа [58]. Авторами [5] предложен способ оптимального насыщения торфа негорючими минеральными наночастицами, препятствующими реакции окисления углерода и поглощающими кислород вследствие эндотермических реакций окисления [59, 60]. Плотность наночастиц в 2–3 раза больше плотности льда и воды, поэтому они быстро оседают в низинном торфе. Разработаны также рекомендации [5] по применению водных растворов слабощелочного состава с добавками наночастиц при использовании пожарной техники в летние периоды. Зимой рекомендуется распыление сухих наночастиц над торфяными полями [5]. Применение рекомендаций, предложенных в [5], может позволить предотвратить и ликвидировать загорания торфяников.

Известен способ [61] подавления диффузионного пламени газовойдыми составами ультрадисперсного (до 60 мкм) распыла. Авторами [61] приведены расчетные зависимости, учитывающие воздействие пара на эффективность ликвидации пламенного горения. Анализ влияния интегральных характеристик испарения жидкости на процесс подавления горения важен для полной ликвидации пожаров.

Опубликованы результаты численного анализа интегральных характеристик испарения одиночных и групп капель распыленной жидкости при движении через пламя фиксированной высоты [62–64], определены условия полного испарения ее в зоне пламени. В последние годы тонкораспыленная вода рассматривается как один из самых перспективных флегматизаторов горения [65–68].

Масштабность процесса горения во времени и в пространстве даже при относительно умеренных площадях распространения пожаров [32] делает нецелесообразным экспериментальное исследование процессов, происходящих при взаимодействии больших масс воды с пламенем, на малоразмерных моделях. Полученные в таких экспериментах результаты затруднительно использовать при анализе реальных процессов.

Известны [62, 63, 69–72] результаты численных исследований, выполненных для монодисперсной совокупности капель тонкораспыленной воды при ее прохождении через высокотемпературные продукты сгорания. Исследованы условия испарения одиночной капли [62, 63], двух [69], группы из четырех [70] и пяти [71] капель. Для нескольких наиболее типичных систем “водяной снаряд” — пламя [62, 63, 69–71] определены зависимости времени испарения капель от температуры продуктов сгорания, скорости движения, размеров и расстояния меж-

ду каплями. Проанализированы условия движения последних в типичных струях тушащей жидкости [70]. Проведен анализ [73] влияния положения капель в “водяном снаряде” относительно соседних на эффективность снижения температуры в его следе при последовательном и параллельном распылении. Установлена целесообразность специальной подготовки “водяных снарядов” (при тушении крупных пожаров с применением авиации) за счет распыления воды с оптимальным расположением капель относительно друг друга и выбором их размеров, исходя из высоты столба пламени и площади обрабатываемого участка пожара [73].

Локальный сброс воды с воздушных судов в зону горения, как правило, приводит к существенному заливанию ограниченных по характерным размерам участков лесных пожаров [39–41]. Достаточно часто избыточное использование воды не является гарантией ликвидации очага горения [15, 33], так как в малой окрестности зоны тушения через относительно небольшой интервал времени может возобновиться процесс горения. Рассматриваемые в качестве перспективных в последние годы водяные и пароводяные “завесы” [16, 38, 43] призваны “закрыть от окислителя” существенно большую площадь пожара по сравнению с “монолитными” массами воды (при этом экономится достаточно много тушащей жидкости). Эффективность применения таких подходов для локализации пламени обоснована известными результатами теоретических и экспериментальных исследований [41, 74]. Однако открытыми остаются вопросы о необходимых и достаточных (минимальных) объемах жидкости для подавления реакции термического разложения в приповерхностных слоях типичных ЛГМ. Применение современных математических моделей и численных методов, например [75–77], позволяет лишь определять толщину испарившегося слоя жидкости, характерные времена прекращения реакции термического разложения, а также влияние внешних условий на интегральные параметры теплопереноса.

В последние годы выполнен цикл численных [78–80] и экспериментальных [81–83] исследований процессов испарения типичной тушащей жидкости — воды при ее движении через пламя в виде капель, струй и больших массивов (“водяных снарядов”). Показано [78, 79, 82, 83], что до 95 % сбрасываемой (нераспыленной) жидкости проходит через пламенную зону горения без испарения и, как следствие, фактически не участвует в тушении пожаров.

### Перспективные методы тушения лесных и торфяных пожаров

Для максимально возможного снижения температуры в пламенной зоне горения и интенсивного

парообразования целесообразно мелкодисперсное распыление тушащей жидкости (в частности, воды) [84–86]. Так, например, в [85] показано, что при средних размерах (условных радиусах) капель воды от 50 до 500 мкм реализуется практически полное испарение жидкости в области пламени высотой до 2 м. Определяющая доля энергии пламени поглощается вследствие большого теплового эффекта парообразования воды (2,26 МДж/кг [87]). Температура смеси продуктов сгорания и водяных паров  $T_m$  снижается до 300–450 К [23, 35]. Формирующуюся при этом парогазовую смесь можно считать следом “водяного снаряда” [23, 80, 85]. При тушении крупных лесных пожаров особое внимание уделяется процессам химического реагирования в прогретых слоях термически разлагающихся лесных горючих материалов [15, 16, 33]. Результаты исследований [85–90] показывают, что теплосодержание области непосредственного газофазного горения типичных ЛГМ (листья березы, хвоя сосны и ели) в десятки раз превышает теплосодержание приповерхностного слоя прогретых до высоких (более 600 К) температур ЛГМ. На снижение температуры пиролизующегося ЛГМ до  $T_d = 400\div 500$  К (значения соответствуют началу термического разложения) необходимо не более 3 % воды, затрачиваемой на подавление пламени в зоне газофазного горения [88–90]. Характерные размеры последней могут достигать 10–15 м [85], в то время как толщина прогретого слоя ЛГМ в условиях лесных пожаров составляет не более 0,1 м, как правило 0,02–0,06 м [15, 33]).

В реальных условиях тушения лесных пожаров далеко не вся сбрасываемая жидкость испаряется при движении через пламя. На поверхности термически разлагающегося ЛГМ возможно образование пленки жидкости конечных размеров и проникновение воды в поры ЛГМ. Проведен анализ эффективности использования теплоты испарения воды при подавлении горения ЛГМ [90–92]. Установлено [90–92], что для влажной древесины механизм подавления реакции пиролиза существенно изменится. Рассчитана толщина пленки тушащей жидкости, необходимая для подавления реакции термического разложения ЛГМ [93, 94]. На рис. 5,а представлены полученные в результате численных исследований [93] зависимости толщины слоя испарившейся при подавлении реакции термического разложения жидкости  $L_e$  от характерного размера прогретого приповерхностного слоя ЛГМ  $L_f$ . Величина  $L_e$  является минимальной толщиной пленки жидкости, при которой температура в ЛГМ становится ниже  $T_d$  [93].

Зависимости  $L_e = f(L_f)$  показывают (см. рис. 5,а), что для подавления (или прекращения) реакции термического разложения в приповерхностных слоях типичных ЛГМ размером до 0,06 м необходимы

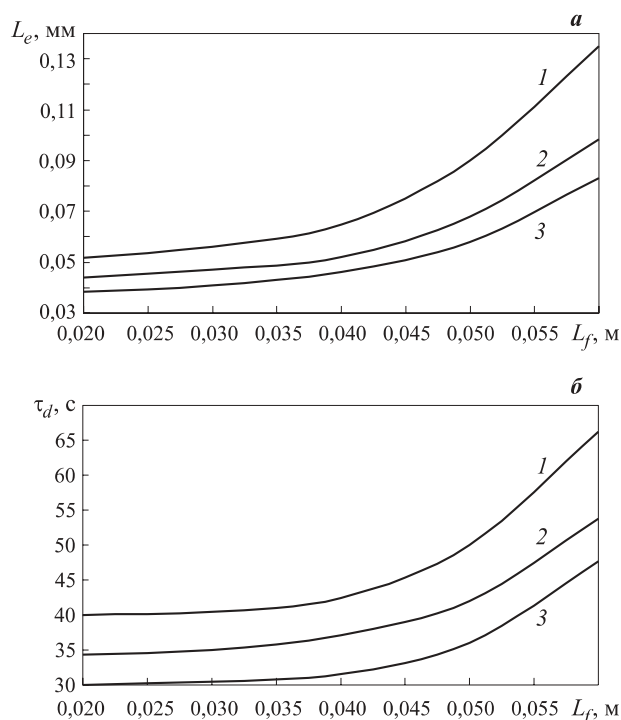


Рис. 5. Зависимость толщины испарившегося слоя пленки жидкости (а) и времени подавления реакции термического разложения (б) от характерного размера ЛГМ [93]: 1 — листья березы; 2 — хвоя сосны; 3 — хвоя ели

относительно тонкие пленки жидкости ( $L_e < 1$  мм) [93]. Выявленная особенность иллюстрирует избыточность типичного для авиации способа подачи воды — локального сбрасывания больших масс последней [42, 43], при котором на поверхности ЛГМ могут формироваться пленки жидкости толщиной, многократно превышающей установленные достаточные (минимальные) значения  $L_e$  (даже в условиях проникновения воды в грунт).

При численном моделировании [93] определены также характерные времена подавления реакции термического разложения рассматриваемых ЛГМ  $t_d$  при воздействии на них пленки воды (рис. 5,б).

Результатами численных исследований физико-химических процессов при испарении воды в порах приповерхностного слоя ЛГМ [93] являются зависимости времени подавления (прекращения) реакции термического разложения от толщины ЛГМ  $L_f$  при глубине проникновения воды в поры на 0,002 м (рис. 6). Толщина ЛГМ при моделировании [94] варьировалась в типичном для практики тушения пожаров диапазоне — 0,02–0,06 м [15]. Установлено, что время  $t_d$  возрастает с увеличением  $L_f$  нелинейно. Так, например, при  $L_f = 0,02\div 0,04$  м времена  $t_d$  отличаются не более чем на 10 с. При увеличении  $L_f$  до 0,06 м зафиксирован рост  $t_d$  на 45 с относительно значений  $t_d$ , полученных при  $L_f = 0,02$  мм. Установленную особенность можно объяснить различными запасами энергии, аккумулированной в ЛГМ.

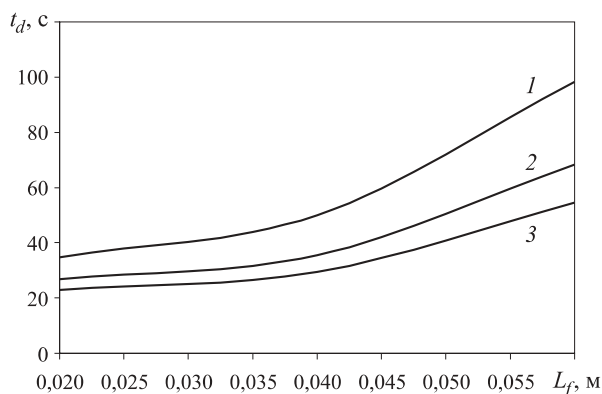


Рис. 6. Зависимость времени подавления реакции термического разложения от толщины ЛГМ [94] при  $L_w = 0,002$  м: 1 — листья березы; 2 — хвоя сосны; 3 — хвоя ели

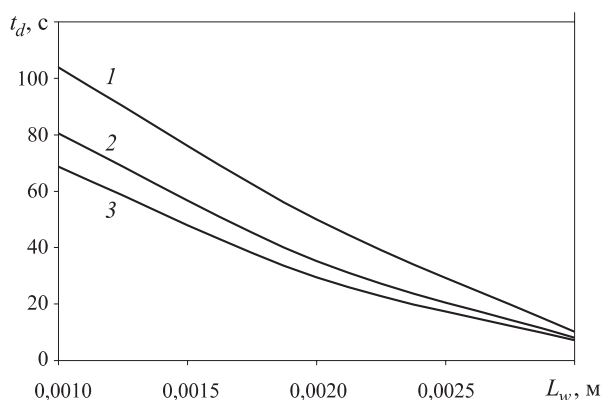


Рис. 7. Зависимость времени подавления реакции термического разложения от толщины слоя ЛГМ-вода при  $L_f = 0,04$  м [94]: 1 — листья березы; 2 — хвоя сосны; 3 — хвоя ели

Зависимости времени подавления реакции термического разложения листьев березы, хвои сосны и ели [94] от толщины слоя последних с водой в порах  $L_w$  при  $L_f = 0,04$  м представлены на рис. 7. Анализ рис. 7 позволяет сделать вывод о том, что инерционность процесса подавления реакции термического разложения существенно снижается при изменении  $L_w$  в диапазоне от 0,001 до 0,003 м. Установлено [94], что в процессе подавления реакции термического разложения ЛГМ происходит испарение слоя жидкости толщиной не более 0,001 м. Это позволяет заключить, что для прекращения термического разложения ЛГМ нецелесообразно “чрезмерное” (избыточное) заливание водой его поверхности.

Довольно часто в тушащие жидкостные составы вводятся инородные включения [95–98] для повышения интенсивности их прогрева и испарения в зоне пожара. Применяют стадийную и послойную подачу аэрозолей в пламя (интенсифицируются процессы парообразования, и генерация паров поддерживается в течение заданного интервала времени). Экспериментальные исследования [82, 99] макроскопических закономерностей испарения распы-

ленных жидкостей (пресной воды и воды с примесями соли) позволили установить интегральные характеристики испарения капель (размеры, масса, концентрация). Показано, что рабочая жидкость с примесями NaCl существенно медленнее испаряется по сравнению с пресной водой [82]. Данный результат хорошо согласуется с данными [23, 41]. Установлено также [82], что при достижении некоторых значений размеров (условных радиусов) капель (менее 0,15 мм) интенсивности испарения капель рассматриваемых жидкостей (с NaCl и без примесей солей) сопоставимы. Известны результаты экспериментальных исследований [100] влияния твердых включений (неметаллических и металлических частиц) в каплях воды (размером от 1 до 5 мм) на изменение размеров последних, убыль массы жидкости и интенсивность парообразования при движении в зоне пламени. На примере углеродистых частиц (размером 50–500 мкм) показано, что твердые включения в каплях жидкости могут существенно влиять на изменение размеров капель и интенсифицировать парообразование в области горения, поэтому для повышения интенсивности испарения воды можно рекомендовать добавление в нее инородных твердых включений. Для достижения максимально возможного количества воды непосредственно у поверхности ЛГМ или торфа можно рекомендовать повысить за счет увеличения размеров капель содержание солей и минимизировать инородные включения в тушащих жидкостных составах.

Для тушения торфа требуется существенно больше времени, чем для тушения ЛГМ [5], так как для торфа характерен беспламенный режим горения. Причем тление может происходить и в изолированных условиях [5], поскольку торфяная масса содержит в порах некоторое количество воздуха. Тушение торфяных пожаров водой сопровождается поглощением воды и быстрым высыханием торфа, что приводит к возобновлению возгорания [5]. Целесообразно при тушении торфа обеспечить формирование пленки воды на его поверхности.

### Заключение

Анализ преимуществ и недостатков современных способов тушения лесных и торфяных пожаров (с акцентом на требуемые ресурсы) позволил установить целесообразность использования при ликвидации таких чрезвычайных ситуаций полидисперсного (распределенного во времени и пространстве) распыления тушащих жидкостных составов.

\*\*\*

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов-Данильян В. И. Причины и уроки торфяных и лесных пожаров 2010 года // Экология и жизнь. — 2010. — № 10. — С. 20–27.
2. Пиджаков А. Ю., Решецкий Ф. Н., Гаврилова О. В. Применение авиации МЧС России при тушении лесных пожаров // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2011. — № 1. — С. 68–71.
3. Иванова Л. В. Лесные пожары 2010 года — очередная причина изменений в лесном кодексе // Север и рынок: формирование экономического порядка. — 2011. — Т. 1, № 27. — С. 103–108.
4. Соловьев С. В. Экологические последствия лесных и торфяных пожаров : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2006.
5. Хорошавин Л. Б., Медведев О. А., Беляков В. А., Беззапонная О. В. Торфяные пожары и способы их тушения // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 11. — С. 85–89.
6. Евграфов А. В. Причины возникновения лесных, торфяных пожаров и разработка нового способа их предупреждения // Нива Поволжья. — 2009. — № 2. — С. 87–90.
7. Протасов В. В., Попов В. М., Юшин В. В., Рыжова М. А. Аспекты возникновения и технологии тушения широкомасштабных лесных пожаров // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. — 2013. — № 1. — С. 199–201.
8. Сверлова Л. И. Метод оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды с учетом поясов атмосферной засушливости и сезонов года. — Хабаровск : ДВ УГМС, 2000. — 46 с.
9. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Лесные пожары на территории России: состояние и проблемы / Под общ. ред. Ю. Л. Воробьева // МЧС России. — М. : ДЭКС-Пресс, 2004. — 312 с.
10. Субботин А. Н. Распространение торфяного пожара при разных условиях тепломассообмена с внешней средой // Пожаровзрывобезопасность. — 2007. — Т. 16, № 5. — С. 42–49.
11. Кулеш Р. Н., Субботин А. Н. Математическое моделирование тепломассопереноса при воспламенении торфа // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 323, № 4. — С. 85–90.
12. Горельский В. А., Жильцов К. Н. Исследование возникновения торфяных пожаров вследствие колебаний температур // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2012. — № 3. — С. 49–54.
13. Царев В. А. Экономический ущерб, нанесенный природными пожарами в России в 2010 году // Лесотехнический журнал. — 2012. — № 3. — С. 147–155.
14. Васильева М. И. Правовое регулирование лесных отношений в новом лесном кодексе РФ // Журнал российского права. — 2007. — № 1 (121). — С. 75–86.
15. Щетинский Е. А. Тушение лесных пожаров. — М. : ВНИИЛМ, 2002. — 104 с.
16. Ковалев А. Н., Журавлева Л. А. Перспективные направления тушения низовых лесных и степных пожаров // Научная жизнь. — 2012. — № 4. — С. 153–157.
17. Гришин А. М., Зима В. П. Новые концепции, способы и устройства для борьбы с лесными пожарами // Экологические системы и приборы. — 2007. — № 10. — С. 57–61.
18. Гусев В. Г., Подрезов Ю. В. Новые технологии борьбы с лесными пожарами // Технологии гражданской безопасности. — 2006. — Т. 3, № 4. — С. 22–26.
19. Гришин А. М., Рейно В. В., Сазанович В. М., Цвык Р. Ш. Некоторые итоги экспериментальных исследований горения ЛГМ // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2009. — Т. 52, № 12. — С. 28–37.
20. Долгов А. А. Лабораторные исследования состава и определения коэффициентов эмиссии продуктов горения лесных материалов // Инженерно-физический журнал. — 2004. — Т. 77, № 6. — С. 168–172.
21. Серков Б. Б., Асеева Р. М., Сивенков А. Б. Физико-химические основы горения и пожарная опасность древесины (часть 2) // Технологии техносферной безопасности. — 2012. — № 1(41). — С. 1.
22. ГОСТ 12.1.044–89\*. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. — Введ. 01.01.91. — М. : ИПК Издательство стандартов, 2001. — 110 с.
23. Копылов Н. П., Чибисов А. Л., Душкин А. Л., Кудрявцев Е. А. Изучение закономерностей тушения тонкораспыленной водой модельных очагов пожара // Пожарная безопасность. — 2008. — № 4. — С. 45–58.
24. Палецкий А. А., Гончикжапов М. Б., Коробейничев О. П. Исследование пиролиза лесных горючих материалов методом зондовой молекулярно-пучковой масс-спектрометрии // Сиббезопасность – Спассиб. — 2011. — № 1. — С. 97–98.

25. Гончикжапов М. Б., Палецкий А. А., Коробейничев О. П. Кинетика пиролиза лесных горючих материалов в инертной/окислительной среде при быстром и медленном темпах нагрева // Сиббезопасность – Спассиб. — 2012. — № 1. — С. 38–44.
26. Colomba Di Blasi, Carmen Branca, Antonio Galgano. Flame retarding of wood by impregnation with boric acid — Pyrolysis products and char oxidation rates // Polymer Degradation and Stability. — 2007. — Vol. 92. — Issue 5. — P. 752–764. doi: 10.1016/j.polyimdegradstab.2007.02.007.
27. Gildas Nguila Inari, Steeve Mounguengui, Stéphane Dumarçay, Mathieu Pétrissans, Philippe Gérardin. Evidence of char formation during wood heat treatment by mildpyrolysis // Evidence of char formation during wood heat treatment by mild pyrolysis. — 2007. — Vol. 92. — Issue 6. — P. 997–1002. doi: 10.1016/j.polyimdegradstab.2007.03.003.
28. Fei Yao, Qinglin Wu, Yong Lei, Weihong Guo, Yanjun Xu. Thermal decomposition kinetics of natural fibers: Activation energy with dynamic thermogravimetric analysis // Polymer Degradation and Stability. — Vol. 93. — Issue 1. — P. 90–98. doi: 10.1016/j.polyimdegradstab.2007.10.012.
29. Colomba Di Blasi, Carmen Branca, Antonio Galgano. Thermal and catalytic decomposition of wood impregnated with sulfur- and phosphorus-containing ammonium salts // Polymer Degradation and Stability. — 2008. — Vol. 93. — Issue 2. — P. 335–346. doi: 10.1016/j.polyimdegradstab.2007.12.003.
30. Lim S. M., Chew M. Y. L. Wood pyrolysis in high temperature and its kinetics // Journal of Applied Fire Science. — 2004. — Vol. 13. — Issue 4. — P. 339–357. doi: 10.2190/9150-W107-0U28-2583.
31. Lim S. M., Chew M. Y. L. Compensation effects in the non-isothermal pyrolysis of wood // Fire Safety Science. — 2005. — P. 1109–1112.
32. Ying Zhang, Jinhua Sun, Jie Li, Jinhua Sun, Qingsong Wang, Xinjie Huang. Effects of altitude and sample width on the characteristics of horizontal flame spread over wood sheets // Fire Safety Journal. — Vol. 51. — July 2012. — P. 120–125. doi: 10.1016/j.firesaf.2012.02.006.
33. Кузнецов Г. В., Барановский Н. В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2009. — 301 с.
34. Korobeinichev O. P., Shmakov A. G., Shvartsberg V. M., Chernov A. A., Yakimov S. A., Koutsenogii K. P., Makarov V. I. Fire suppression by low-volatile chemically active fire suppressants using aerosol technology // Fire Safety Journal. — 2012. — Vol. 51. — P. 102–109. doi: 10.1016/j.firesaf.2012.04.003.
35. Xiao X. K., Cong B. H., Wang X. S., Kuang K. Q., Yuen R. K. K., Liao G. X. On the behavior of flame expansion in pool fire extinguishment with steam jet // Journal of Fire Sciences. — 2011. — Vol. 29. — Issue 4. — P. 339–360. doi: 10.1177/0734904110397812.
36. Meng N., Hu L., Liu S., Wu L., Chen L., Liu B. Full-scale experimental study on fire suppression performance of a designed water mist system for rescue station of long railway tunnel // Journal of Fire Sciences. — 2012. — Vol. 30. — Issue 2. — P. 138–157. doi: 10.1177/0734904111428898.
37. Tang Z., Fang Z., Yuan J. P., Merci B. Experimental study of the downward displacement of fire-induced smoke by water sprays // Fire Safety Journal. — 2013. — Vol. 55. — P. 35–49. doi: 10.1016/j.firesaf.2012.10.014.
38. 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.
39. Горшков В. С., Москвиллин Е. А., Хасанов И. Р. Оценка параметров тушения лесных пожаров авиационными средствами // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их источников : сборник тезисов научно-практической конференции. — М. : ИИЦ ВНИИ ГОЧС, 2001. — С. 34–35.
40. Хасанов И. Р., Горшков В. С., Москвиллин Е. А. Параметры процесса тушения лесных пожаров при подаче воды авиационной техникой // Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия : материалы международной конференции. — Иркутск : ВСИ МВД России, 2001. — С. 157–158.
41. Андрияшкин А. Ю., Пелех М. Т. Эффективность пожаротушения тонкораспыленной водой // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2012. — Т. 21, № 1. — С. 64–69.
42. Хасанов И. Р., Москвиллин Е. А. Авиационные методы тушения крупных лесных пожаров // Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков: материалы XV научно-практической конференции. — М. : ВНИИПО, 1999. — Ч. 1. — С. 300–301.
43. Wighus R. Water mist fire suppression technology — status and gaps in knowledge // Proceedings of the International Water Mist Conference. — Vienna, 2001. — P. 1–26.
44. Пат. 2403927 Российская Федерация. МПК А62С2/00, А62С37/08. Способ тушения пожара распыленной водой с добавками / Баратов А. Н., Забегаев В. И., Цариченко С. Г. — № 2008141350/12; заявл. 17.10.2008; опубл. 20.11.2010, Бюл. № 32.

45. Пат. 2131379 Российская Федерация. МПК 6В64D1/16А. Способ пожаротушения с использованием летательного аппарата и устройство для его осуществления / Зуев Ю. В., Карпышев А. В., Лепешинский И. А. — № 98101933/28; заявл. 06.02.1998; опубл. 10.06.1999.
46. Пат. 2394724 Российская Федерация. МПК В64D116, А62С3/02, А62С5/02. Способ и вертолетное устройство комбинированного тушения пожаров лесных массивов и промышленных объектов (варианты) / Куприн Г. Н.; Закрытое акционерное общество “НПО СОПОТ”. — № 2008119366/11; заявл. 12.05.2008, опубл. 20.07.2010, Бюл. № 20.
47. Пат. 2449825 Российская Федерация. МПК А62D1/00 (2006.01). Состав для тушения пожара / Староверов Н. Е. — № 2010151394/05; заявл. 14.12.2010; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13.
48. Пат. 2262367 Российская Федерация. МПК 7А62D1/00А. Водный состав для тушения пожаров / Ветошкин Ю. П., Горелов В. В. — № 2004122184/15; заявл. 19.07.2004, опубл. 20.10.2005.
49. Гришин А. Н. Общая физико-математическая модель зажигания и горения древесины // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2010. — № 2. — С. 60–70.
50. Мищенко К. П., Равдель А. А. Краткий справочник физико-химических величин. — Л. : Химия, 1972. — 200 с.
51. Чудинов С. В., Трофимов А. Н., Узлов Г. А. Справочник лесохимика. — М. : Лесная промышленность, 1987. — 271 с.
52. Пат. 2158155 Российская Федерация. МПК 7А62D1/00А. Пенообразующий состав для тушения пожаров / Смагин В. В. — № 99120163/12; заявл. 20.09.1999; опубл. 27.10.2000.
53. Казаков М. В. Применение поверхностно-активных добавок для тушения пожаров. — М. : Стройиздат, 1977. — 80 с.
54. Лицтван И. И. Исследование возможности использования полимеров и ПАВ как структурообразователей торфяных почв. Новые процессы и продукты переработки торфа : сб. статей. — М. : Наука и техника, 1982. — С. 15–19.
55. Соловьев С. В. Выбор огнетушащих составов с учетом особенностей связи воды в торфе // Вестник Академии ГПС МЧС России. — 2004. — № 2. — С. 61–66.
56. Никитин Ю. А. Предупреждение и тушение пожаров в лесах и на торфяниках. — М. : Россельхозиздат, 1986. — 96 с.
57. Соловьев С. В. Экологические последствия лесных и торфяных пожаров : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2006. — 222 с.
58. Чернодедов А. С., Хорошилов О. А. Технологические методы замедления процесса горения торфа // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2009. — № 4. — С. 53–55.
59. Хорошавин Л. Б. Разработка и внедрение нанотехнологий предотвращения и ликвидации возгорания торфяников // Уральская горная школа — регионам : сборник докладов Международной научно-практической конференции. — Екатеринбург : УГГУ, 2011. — С. 472–473.
60. Хорошавин Л. Б., Медведев О. А., Беляков В. А. и др. Модифицированный торф — это торф нового поколения // Современные нанотехнологии. Сканирующая зондовая микроскопия : сборник тезисов. — Екатеринбург : УрГУ, 2011. — С. 17.
61. Копылов С. Н., Казаков А. В., Бухтояров Д. В., Смирнов Н. В., Кулаков В. Г., Гладили А. В., Исаев Н. С., Борисов Ю. А. Механизм тушения пламени газодыяными составами ультрадисперсного распыла // Пожарная безопасность. — 2014. — № 2. — С. 67–71.
62. 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.
63. Глушков Д. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Численное исследование тепломассопереноса при движении “тандела” капель воды в высокотемпературной газовой среде // Тепловые процессы в технике. — 2012. — Т. 4, № 12. — С. 531–538.
64. 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.
65. Карпышев А. В., Душкин А. Л., Рязанцев Н. Н. Разработка высокоэффективного универсального огнетушителя на основе генерации струй тонкораспыленных огнетушащих веществ // Пожаровзрывобезопасность. — 2007. — Т. 16, № 2. — С. 69–73.
66. Гаев Д. В., Ершов А. В., Прохоров В. П., Карпышев А. В., Душкин А. Л. Система противопожарной защиты салона вагона метрополитена на базе высоких технологий // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2009. — № 3. — С. 67–72.
67. Душкин А. Л., Ловчинский С. Е. Взаимодействие пламени горючей жидкости с тонкораспыленной водой // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 11. — С. 53–55.

68. Душкин А. Л., Карпышев А. В., Ловчинский С. Е. Особенности распространения жидкостной струи в атмосфере // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 12. — С. 45–48.
69. Стрижак П. А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 8. — С. 26–31.
70. Волков Р. С., Высокоморная О. В., Стрижак П. А. Численное исследование условий взаимодействия диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания // Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 10. — С. 74–79.
71. Андреев Г. Г., Глушков Д. О., Панин В. Ф., Стрижак П. А. Тепломассоперенос при взаимодействии диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания // Бутлеровские сообщения. — 2012. — Т. 31, № 8. — С. 86–94.
72. Стрижак П. А. Численный анализ процесса испарения капли, движущейся в струе воды через высокоскоростные продукты сгорания // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 9. — С. 17–23.
73. 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.
74. Волков Р. С., Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование закономерностей испарения тонкораспыленной воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Бутлеровские сообщения. — 2013. — Т. 35, № 9. — С. 38–46.
75. Исаев С. А., Баранов П. А., Пригородов Ю. С., Судаков А. Г., Усачов А. Е. Численный анализ влияния сжимаемости на турбулентное, симметричное обтекание вязким газом цилиндра с круговой вихревой ячейкой // Инженерно-физический журнал. — 2008. — Т. 81, № 2. — С. 330–337.
76. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Математическое моделирование сложного теплопереноса в замкнутой прямоугольной области // Теплофизика и аэромеханика. — 2009. — Т. 16, № 1. — С. 123–133.
77. Исаев С. А., Лысенко Д. А. Тестирование численных методов, конвективных схем, алгоритмов аппроксимации потоков и сеточных структур на примере сверхзвукового течения в ступенчатом канале с помощью пакетов CFX и FLUENT // Инженерно-физический журнал. — 2009. — Т. 82, № 2. — С. 326–330.
78. Стрижак П. А. Влияние распределения капель в “водяном снаряде” на температуру и концентрацию продуктов сгорания в его следе // Инженерно-физический журнал. — 2013. — Т. 86, № 4. — С. 839–848.
79. Стрижак П. А. Численный анализ диффузионно-конвективных процессов тепломассопереноса при движении капель воды через высокотемпературные продукты сгорания // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 7. — С. 11–21.
80. Strizhak P. A. Influence of droplet distribution in a “water slug” on the temperature and concentration of combustion products in its wake // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2013. — Vol. 86, No. 4. — P. 895–904. doi: 10.1007/s10891-013-0909-9.
81. Волков Р. С., Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование закономерностей испарения тонкораспыленной воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Бутлеровские сообщения. — 2013. — Т. 35, № 9. — С. 38–46.
82. 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.
83. Волков Р. С., Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование изменения массы капель воды при их движении через высокотемпературные продукты сгорания // Инженерно-физический журнал. — 2013. — Т. 86, № 6. — С. 1327–1332.
84. Шумихин А. А., Карпов А. И., Корепанов М. А., Новожилов В. Б. Численное исследование воздействия тонкораспыленной воды на турбулентное диффузионное пламя // Химическая физика и мезоскопия. — 2012. — Т. 14, № 3. — С. 391–400.
85. Высокоморная О. В., Марков А. О., Назаров М. Н., Стрижак П. А., Янов С. Р. Численное исследование влияния условий распыления воды на температуру в следе “водяного снаряда” // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 322, № 4. — С. 24–31.
86. 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.

87. Исаченко В. П. Теплообмен при конденсации. — М. : Энергия, 1977. — 239 с.
88. Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Heat and mass transfer in the process of movement of water drops in a high-temperature gas medium // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2013. — Vol. 86, No. 1. — P. 62–68.
89. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние формы капли воды на результаты математического моделирования ее испарения при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Тепловые процессы в технике. — 2013. — № 6. — С. 254–261.
90. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Оценка эффективности использования теплоты испарения воды при тушении лесных пожаров // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 9. — С. 57–63.
91. Гнездилов Н. Н., Козлов И. М., Доброго К. В. Математическое моделирование горения торфяного слоя. Влияние конденсации паров воды // Инженерно-физический журнал. — 2012. — Т. 58, № 5. — С. 982–990.
92. Горешнев М. А., Казарин А. Н., Лопатин В. В., Секисов Ф. Г., Смердов О. В. Комбинированный метод сушки древесины // Инженерно-физический журнал. — 2013. — Т. 86, № 2. — С. 318–321.
93. Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Численное исследование испарения пленки воды на поверхности лесного горючего материала // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 6. — С. 18–25.
94. Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Численное исследование физико-химических процессов при испарении воды в порах приповерхностного слоя лесного горючего материала // Инженерно-физический журнал. — 2014. — Т. 87, № 4. — С. 751–758.
95. Joseph P., Nichols E., Novozhilov V. A comparative study of the effects of chemical additives on the suppression efficiency of water mist // Fire Safety Journal. — 2013. — Vol. 58. — P. 221–225. doi: 10.1016/j.firesaf.2013.03.003.
96. Zhou X., D'Aniello S. P., Hong-Zeng Yu. Spray characterization measurements of a pendent fire sprinkler // Fire Safety Journal. — 2012. — Vol. 54. — P. 36–48. doi: 10.1016/j.firesaf.2012.07.007.
97. Yoshida A., Udagawa T., Momoto Y., Naito H., Saso Y. Experimental study of suppressing effect of fine water droplets on propane/air premixed flames stabilized in the stagnation flowfield // Fire Safety Journal. — 2013. — Vol. 58. — P. 84–91. doi: 10.1016/j.firesaf.2013.01.025.
98. Коробейничев О. П., Шмаков А. Г., Чернов А. А., Большова Т. А., Шварцберг В. М., Куценкогий К. П., Макаров В. И. Тушение пожаров с помощью аэрозолей растворов солей // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 20–25.
99. Волков Р. С., Жданова А. О., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование интегральных характеристик испарения типичных распыленных тушащих жидкостей при их движении через пламя // Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 12. — С. 33–37.
100. Волков Р. С., Забелин М. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние твердых включений в каплях жидкости на интенсивность парообразования в зоне пламени // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 5. — С. 10–17.

Материал поступил в редакцию 1 декабря 2014 г.

English

## ABOUT POSSIBILITY OF THE FOREST AND PEAT FIRES EXTINGUISHING BY THE POLYDISPERSE WATER FLOWS

**ZHDANOVA A. O.**, Postgraduate Student of Automation Thermal and Power Processes Department, Institute of Power Engineering of National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: zhdanovaao@tpu.ru)

**KUZNETSOV G. V.**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Theoretical and Industrial Heat Engineering Department, Institute of Power Engineering of National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: elf@tpu.ru)

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

**KHASANOV I. R.**, Head of the Research Center, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Balashikha, 143912, Russian Federation; e-mail address: irhas@rambler.ru)

**FEDOTKIN D. V.**, Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Balashikha, 143912, Russian Federation; e-mail: fdv982@mail.ru)

## ABSTRACT

Special attention in the paper is given to fire protection problems of forests and peat bogs, in particular, the development problem of new resource efficient techniques and methods of disaster relief. The causes of the forest and peat fires were considered and analyzed.

The analysis of longstanding theoretical and experimental researches was carried out, and it was showed that up to 95 % of being dropped (not atomized) liquid is not actually used during the extinguishing of fires while passing through the flaming combustion area without evaporation).

The expediency of special “water slug” preparation at large fire extinguishing using aircraft was determined.

The analysis of modern and promising methods of extinguishing allowed to determine the usage practicability of interspaced in time and space polydisperse atomization of the extinguishing liquid compositions.

**Keywords:** forest and peat fires; suppression of chemical reaction; fire extinguishing methods; vapor-water flows.

## REFERENCES

1. Danilov-Danilyan V. I. Prichiny i uroki torfyanykh i lesnykh pozharov 2010 goda [Causes and lessons of peat and forest fires of 2010]. *Ekologiya i zhizn — Ecology and Life*, 2010, no. 10, pp. 20–27.
2. Pidzhakov A. Yu., Reshetskii F. N., Gavrilova O. V. Primeneniye aviatsii MChS Rossii pri tushenii lesnykh pozharov [Using aviation of Russian Ministry of Emergency in putting out forest fires]. *Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii — Bulletin of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2011, no. 1, pp. 68–71.
3. Ivanova L. V. Lesnyye pozhary 2010 goda — ocherednaya prichina izmeneniy v lesnom kodekse [Forest fires of 2010 — the next reason for changes in Forestry Code]. *Sever i rynok: formirovaniye ekonomicheskogo poriyadka — North and Market: Formation of Economic Order*, 2011, vol. 1, no. 27, pp. 103–108.
4. Solovyev S. V. *Ekologicheskiye posledstviya lesnykh i torfyanykh pozharov. Dis. kand. tekhn. nauk* [Ecological consequences of the forest and peat fires. Cand. techn. sci. diss.]. Moscow, 2006.
5. Khoroshavin L. B., Medvedev O. A., Belyakov V. A., Bezzaponnaya O. V. Torfyanyye pozhary i sposoby ikh tusheniya [Peat fires and ways of their suppression]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 11, pp. 85–89.
6. Yevgrafov A. V. Prichiny vozniknoveniya lesnykh, torfyanykh pozharov i razrabotka novogo sposoba ikh preduprezhdeniya [Causes of occurrence of the forest, peat fires and development of a new method of its prevention]. *Niva Povolzhya*, 2009, no. 2, pp. 87–90.
7. Protasov V. V., Popov V. M., Yushin V. V., Ryzhova M. A. Aspekty vozniknoveniya i tekhnologii tusheniya shirokomasshtabnykh lesnykh pozharov [Aspects of emergence and technology of suppression large-scale forest fires]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii — Bulletin of Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2013, no. 1, pp. 199–201.
8. Sverlova L. I. *Metod otsenki pozharnoy opasnosti v lesakh po usloviyam pogody s uchetom po yasov atmosferynoy zasushlivosti i sezonov goda* [Evaluation method of fire danger in the forests under by conditions weather taking into account the zones of atmospheric dryness and year seasons]. Khabarovsk, DV UGMS Publ., 2000. 46 p.
9. Vorobyev Yu. L., Akimov V. A., Sokolov Yu. I. *Lesnyye pozhary na territorii Rossii: sostoyaniye i problemy* [Forest fires within the territory of Russia. State and problems]. Moscow, Deko-Press Publ., 2004. 312 p.
10. Subbotin A. N. Rasprostraneniye torfyanogo pozhara pri raznykh usloviyakh teplomassoobmena s vneshney sredoy [Circulation of the peat fire spread under different conditions of heat and mass transfer with outside environment]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2007, vol. 16, no. 5, pp. 42–49.

11. Kulesh R. N., Subbotin A. N. Matematicheskoye modelirovaniye teplomassoperenosa pri vosplamene-nii torfa [Mathematical modeling of heat and mass transfer at peat ignition]. *Izvestiya Tomskogo politekh-nicheskogo universiteta — Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 85–90.
12. Gorelskiy V. A., Zhiltsov K. N. Issledovaniye vozniknoveniya torfyanykh pozharov vsledstviye kole-baniy temperatur [Investigation of peat ignition due to temperature fluctuations]. *Vestnik Tomskogo go-sudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika — Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2012, no. 3, pp. 49–54.
13. Tsarev V. A. Ekonomicheskiy ushcherb, nanesenny prirodnymi pozharemi v Rossii v 2010 godu [The economic damage by the natural fires in Russia in 2010]. *Lesotekhnicheskii zhurnal — Journal of Forestry Engineering*, 2012, no. 3, pp. 147–155.
14. Vasilyeva M. I. Pravovoye regulirovaniye lesnykh otnosheniy v novom lesnom kodekse RF [Statutory regulation of the forestry affairs in the new Forestry Code of Russian Federation]. *Zhurnal rossiyskogo prava — Journal of Russian Law*, 2007, no. 1 (121), pp. 75–86.
15. Shchetinskiy Ye. A. *Tusheniye lesnykh pozharov* [Suppression of forest fires]. Moscow, VNIILM Publ., 2002. 104 p.
16. Kovalev A. N., Zhuravleva L. A. Perspektivnyye napravleniya tusheniya nizovykh lesnykh i stepnykh pozharov [Perspective directions of suppressing forest and steppe fires]. *Nauchnaya zhizn — Scientific Life*, 2012, no. 4, pp. 153–157.
17. Grishin A. M., Zima V. P. Novyye kontseptsii, sposoby i ustroystva dlya borby s lesnymi pozharemi [The new concept, ways and devices for struggle against forest fires]. *Ekologicheskkiye sistemy i pribory — Ecological Systems and Devices*, 2007, no. 10, pp. 57–61.
18. Gusev V. G., Podrezov Yu. V. Novyye tekhnologii borby s lesnymi pozharemi [Technological innova-tions of forest fire fighter]. *Tekhnologii grazhdanskoй bezopasnosti — Technologies of Civil Security*, 2006, vol. 3, no. 4, pp. 22–26.
19. Grishin A. M., Reyno V. V., Sazanovich V. M., Tsvyk R. Sh. Nekotoryye itogi eksperimentalnykh issle-dovaniy goreniya LGM [Some results of experiments investigation of combustion FFM]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika — Bulletin of Higher Education Establishments. Physics*, 2009, vol. 52, no. 12, pp. 28–37.
20. Dolgov A. A. Laboratornyye issledovaniya sostava i opredeleniya koeffitsientov emissii produktov go-reniya lesnykh materialov [Laboratory investigations of the composition and determination of the coef-ficients of emission of the products of burning of forest materials]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysic*, 2004, vol. 77, no. 6, pp. 1253–1258.
21. Serkov B. B., Aseeva R. M., Sivenkov A. B. Fiziko-khimicheskiye osnovy goreniya i pozharnaya opas-nost drevesiny (chast 2) [Physical and chemical nature of combustion and fire hazard of wooden ma-terials (Part 2)]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti — Technologies of Technosphere Safety*, 2012, no. 1 (41), p. 1.
22. Interstate standard 12.1.044–89\*. Occupational safety standards system. Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indices and methods of their determination. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov, 2001. 110 p. (in Russian).
23. Kopylov N. P., Chibisov A. L., Dushkin A. L., Kudryavtsev Ye. A. Izucheniye zakonomernostey tushe-niya tonkoraspylennoy vodoy modelnykh ochagov pozhara [Investigation of suppression regularities of standardized fire source by water spray]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2008, no. 4, pp. 45–58.
24. Paletskiy A. A., Gonchikzhapov M. B., Korobeynichev O. P. Issledovaniye piroliza lesnykh goryu-chikh materialov metodom zondovoy molekulyarno-puchkovoy mass-spektrometrii [Study of forest fuels pyrolysis using molecular beam mass spectrometry]. *Sibbezopasnost – Spassib — SIPS Siberia*, 2011, no. 1, pp. 97–98.
25. Gonchikzhapov M. B., Paletskiy A. A., Korobeynichev O. P. Kinetika piroliza lesnykh goryuchikh materialov v inertnoy/okislitelnoy srede pri bystrom i medlennom tempakh nagreva [Kinetics of pyro-lysis of forest fuels in inert/oxidizing media at the high and low heating rate]. *Sibbezopasnost – Spassib — SIPS Siberia*, 2012, no. 1, pp. 38–44.
26. Colomba Di Blasi, Carmen Branca, Antonio Galgano. Flame retarding of wood by impregnation with boric acid — Pyrolysis products and char oxidation rates. *Polymer Degradation and Stability*, 2007, vol. 92, issue 5, pp. 752–764. doi: 10.1016/j.polyimdegradstab.2007.02.007.
27. Gildas Ngula Inari, Steeve Mounguengui, Stéphane Dumarçay, Mathieu Pétrissans, Philippe Gérardin. Evidence of char formation during wood heat treatment by mildpyrolysis. *Evidence of Char Formation during Wood Heat Treatment by Mildpyrolysis*, 2007, vol. 92, issue 6, pp. 997–1002. doi: 10.1016/j.po-lyimdegradstab.2007.03.003.

28. Fei Yao, Qinglin Wu, Yong Lei, Weihong Guo, Yanjun Xu. Thermal decomposition kinetics of natural fibers: Activation energy with dynamic thermogravimetric analysis. *Polymer Degradation and Stability*, vol. 93, issue 1, pp. 90–98. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2007.10.012.
29. Colomba Di Blasi, Carmen Branca, Antonio Galgano. Thermal and catalytic decomposition of wood impregnated with sulfur- and phosphorus-containing ammonium salts. *Polymer Degradation and Stability*, 2008, vol. 93, issue 2, pp. 335–346. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2007.12.003.
30. Lim S. M., Chew M. Y. L. Wood pyrolysis in high temperature and its kinetics. *Journal of Applied Fire Science*, 2004, vol. 13, issue 4, pp. 339–357. doi: 10.2190/9150-W107-0U28-2583.
31. Lim S. M., Chew M. Y. L. Compensation effects in the non-isothermal pyrolysis of wood. *Fire Safety Science*, 2005, pp. 1109–1112.
32. Ying Zhang, Jinhua Sun, Jie Li, Jinhua Sun, Qingsong Wang, Xinjie Huang. Effects of altitude and sample width on the characteristics of horizontal flame spread over wood sheets. *Fire Safety Journal*, July 2012, vol. 51, pp. 120–125. doi: 10.1016/j.firesaf.2012.02.006.
33. Kuznetsov G. V., Baranovskiy N. V. *Prognoz vozniknoveniya lesnykh pozharov i ikh ekologicheskikh posledstviy* [Forecast of emergence of forest fires and their ecological consequences]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2009. 301 p.
34. Korobeinichev O. P., Shmakov A. G., Shvartsberg V. M., Chernov A. A., Yakimov S. A., Koutsenogii K. P., Makarov V. I. Fire suppression by low-volatile chemically active fire suppressants using aerosol technology. *Fire Safety Journal*, 2012, vol. 51, pp. 102–109. doi: 10.1016/j.firesaf.2012.04.003.
35. Xiao X. K., Cong B. H., Wang X. S., Kuang K. Q., Yuen R. K. K., Liao G. X. On the behavior of flame expansion in pool fire extinguishment with steam jet. *Journal of Fire Sciences*, 2011, vol. 29, issue 4, pp. 339–360. doi: 10.1177/0734904110397812.
36. Meng N., Hu L., Liu S., Wu L., Chen L., Liu B. Full-scale experimental study on fire suppression performance of a designed water mist system for rescue station of long railway tunnel. *Journal of Fire Sciences*, 2012, vol. 30, issue 2, pp. 138–157. doi: 10.1177/0734904111428898.
37. Tang Z., Fang Z., Yuan J. P., Merci B. Experimental study of the downward displacement of fire-induced smoke by water sprays. *Fire Safety Journal*, 2013, vol. 55, pp. 35–49. doi: 10.1016/j.firesaf.2012.10.014.
38. 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.
39. Gorshkov B. C., Moskvilin Ye. A., Khasanov I. R. Otsenka parametrov tusheniya lesnykh pozharov aviatsionnymi sredstvami [Parameter estimation of forest fires suppression by air means]. *Problemy prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy i ikh istochnikov. Sbornik tezisev nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Forecasting problems of emergency situations and its sources. Collection of scientific and practical conference theses]. Moscow, IITS VNII GOChS Publ., 2001, pp. 34–35.
40. Khasanov I. R., Gorshkov V. S., Moskvilin Ye. A. Parametry protsessy tusheniya lesnykh pozharov pri podache vody aviatsionnoy tekhniki [Parameters of forest fires suppression process under the water supply by the aeronautical equipment]. *Lesnyye i stepnyye pozhary: vozniknoveniye, rasprostraneniye, tusheniye i ekologicheskiye posledstviya. Materialy mezhdunarodnoy konferentsii* [Forest and steppe fires: origination, spread, extinguishing and ecological consequences. Materials of the international conference]. Irkutsk, VSI MVD Rossii Publ., 2001. pp. 157–158.
41. Andryushkin A. Yu., Pelekh M. T. Effektivnost pozharotusheniya tonkoraspylennoy vodoy [Efficiency of the stewing fire by sprayed water]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere — Risk Management Problems in the Technosphere*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 64–69.
42. Khasanov I. R., Moskvilin Ye. A. Aviatsionnyye metody tusheniya krupnykh lesnykh pozharov [Aviation methods of major forest fires suppression]. *Problemy goreniya i tusheniya pozharov na rubezhe vekov. Materialy XV nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems of combustion and suppression of fires at the turn of the century. Materials of XV Scientific Conference]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 1999, part 1, pp. 300–301.
43. Wighus R. Water mist fire suppression technology — status and gaps in knowledge. *Proceedings of the International Water Mist Conference*. Vienna, 2001, pp. 1–26.
44. Baratov A. N., Zabegaev V. I., Tsarichenko S. G. *Sposob tusheniya pozhara raspylennoy vodoy s do-bavkami* [Method of fire extinguishing by means of dispersed water with additives]. Patent RF, no. 2403927, 20.11.2010.
45. Zuyev Yu. V., Karpyshev A. V., Lepeshinskiy I. A. *Sposob pozharotusheniya s ispolzovaniyem letatel-nogo apparata i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Method of extinguishing fire by means of flying vehicle and device for realization of this method]. Patent RF, no. 2131379, 10.06.1999.

46. Kuprin G. N. *Sposob i vertoletnoye ustroystvo kombinirovannogo tusheniya pozharov lesnykh massiv i promyshlennykh ob'ektov (varianty)* [Method and helicopter device for combined forest and industrial fire fighting (versions)]. Patent RF, no. 2394724, 20.07.2010.
47. Staroverov N. Ye. *Sostav dlya tusheniya pozhara* [Composition for fire fighting (versions)]. Patent RF, no. 2449825, 10.05.2012.
48. Vetoshkin Yu. P., Gorelov V. V. *Vodnyy sostav dlya tusheniya pozharov* [Aqueous fire-extinguishing composition]. Patent RF, no. 2262367, 20.10.2005.
49. Grishin A. N. Obshchaya fiziko-matematicheskaya model zazhiganiya i goreniya drevesiny [General physical-mathematical model of ignition and burning of wood]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika — Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2010, no. 2, pp. 60–70.
50. Mishchenko K. P., Ravdel A. A. *Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin* [Quick-reference book of physical and chemical values]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972. 200 p.
51. Chudinov S. V., Trofimov A. N., Uzlov G. A. *Spravochnik lesokhimiya* [Reference book of a forest chemist]. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1987. 271 p.
52. Smagin V. V. *Penoobrazuyushchiy sostav dlya tusheniya pozharov* [Fire-extinguishing foaming composition]. Patent RF, no. 2158155, 27.10.2000.
53. Kazakov M. V. *Primeneniye poverkhnostno-aktivnykh dobavok dlya tusheniya pozharov* [Application of surfactant admixture for suppression of the fires]. Moscow, Stroyizdat, 1977. 80 p.
54. Lishchtvan I. I. Issledovaniye vozmozhnosti ispolzovaniya polimerov i PAV kak strukturoobrazovately torfyanykh pochv [Using feasibility investigation of polymers and surface-active agent as structure-forming agents of peat soils]. *Novyye protsessy i produkty pererabotki torfa. Sbornik statey* [New processes and products of peat processing. Collection of articles]. Moscow, Nauka i tekhnika Publ., 1982, pp. 15–19.
55. Solovyev S. V. Vybory ognetyashchikh sostavov s uchetom osobennostey svyazi vody v torfe [Choice of fire-extinguishing compositions taking into account specific features of water link in peat]. *Vestnik Akademii GPS MChS Rossii — Bulletin of State Fire Academy of Emercom of Russia*, 2004, no. 2, pp. 61–66.
56. Nikitin Yu. A. *Preduprezhdeniye i tusheniye pozharov v lesakh i na torfyanikakh* [The prevention and suppression of the fires in the forests and on peat bogs]. Moscow, Rosselkhozizdat Publ., 1986. 96 p.
57. Solovyev S. V. *Ekologicheskiye posledstviya lesnykh i torfyanykh pozharov. Dis. kand. tekhn. nauk* [Ecological consequences of the forest and peat fires. Cand. techn. sci. diss.]. Moscow, 2006. 222 p.
58. Chernodedov A. S., Khoroshilov O. A. Tekhnologicheskiye metody zamedleniya protsessa goreniya torfa [Technological methods of decrease of process of peat's burning]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere — Risk Management Problems in the Technosphere*, 2009, no. 4, pp. 53–55.
59. Khoroshavin L. B. Razrabotka i vnedreniye nanotekhnologiy predotvrashcheniya i likvidatsii vozgoraniya torfyanikov [Development and application of prevention and liquidation nanotechnologies of peat bogs ignition]. *Uralskaya gornaya shkola — regionam. Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The Ural Mountain School — to Regions. Book of reports of the International scientific and practical conference]. Yekaterinburg, Ural State Mining University Publ., 2011, pp. 472–473.
60. Khoroshavin L. B., Medvedev O. A., Belyakov V. A. Modifitsirovanny torf — eto torf novogo pokoleniya [The modified peat is a peat of the next generation]. *Sovremennyye nanotekhnologii. Skaniruyushchaya zondovaya mikroskopiya. Sbornik tezisev* [Modern nanotechnologies. The scanned probe microscopy. Collection of abstracts]. Yekaterinburg, Ural Federal University Publ., 2011, p. 17.
61. Kopylov S. N., Kazakov A. V., Bukhtoyarov D. V., Smirnov N. V., Kulakov V. G., Gladilin A. V., Isaev N. S., Borisov Yu. A. Mekhanizm tusheniya plameni gazovodyanymi sostavami ultradispersnogo raspyla [Flame extinguishment mechanism of gas-water compositions of ultradisperse atomization]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2014, no. 2, pp. 67–71.
62. 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.
63. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Chislennoye issledovaniye teplomassoperenosa pri dvizhenii “tandema” kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Numerical research of a heat and mass transfer when moving of “tandem” of water droplets in the high-temperature gas area]. *Teplovyye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Equipment*, 2012, vol. 4, no. 12, pp. 531–538.

64. 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 and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 1, pp. 62–68.
65. Karpyshev A. V., Dushkin A. L., Ryazantsev N. N. Razrabotka vysokoeffektivnogo universalnogo ognnetushitelya na osnove generatsii struy tonkoraspylennykh ognnetushashchikh veshchestv [Development of the highly effective universal fire extinguisher on the basis of generation of jets of sprayed fire extinguishing substances]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2007, vol. 16, no. 2, pp. 69–73.
66. Gaev D. V., Yershov A. V., Prokhorov V. P., Karpyshev A. V., Dushkin A. L. Sistema protivopozharnoy zashchity salona vagona metropolitena na baze vysokikh tekhnologiy [Metro carriage fire protection system based on high technologies]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy — Problems of Safety and Emergency Situations*, 2009, no. 3, pp. 67–72.
67. Dushkin A. L., Lovchinskiy S. Ye. Vzaimodeystviye plameni goryuchey zhidkosti s tonkoraspylennoy vodoy [Interaction between combustible liquid flame and water mist]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 11, pp. 53–55.
68. Dushkin A. L., Karpyshev A. V., Lovchinskiy S. Ye. Osobennosti rasprostraneniya zhidkostnoy strui v atmosfere [Liquid jet spread features in atmosphere]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 12, pp. 45–48.
69. 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 droplets when moving through high temperature gas area]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 8, pp. 26–31.
70. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Strizhak P. A. Chislennoye issledovaniye usloviy vzaimodeystviya dispergirovannogo flegmatizatora goreniya s vysokotemperaturnymi produktami sgoraniya [Numerical research of interaction conditions between the dispersed combustion phlegmatizer and the high-temperature combustion products]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti — Safety of Work in the Industry*, 2012, no. 10, pp. 74–79.
71. Andreev G. G., Glushkov D. O., Panin V. F., Strizhak P. A. Teplomassoperenos pri vzaimodeystvii dispergirovannogo flegmatizatora goreniya s vysokotemperaturnymi produktami sgoraniya [Heat and mass transfer when interacting between the dispersed combustion phlegmatizer and the high-temperature combustion products]. *Butlerovskiye soobshcheniya — Butlerov Communications*, 2012, vol. 31, no. 8, pp. 86–94.
72. Strizhak P. A. Chislennyy analiz protsessa ispareniya kapli, dvizhushcheysya v struye vody cherez vysokoskorostnyye produkty sgoraniya [The numerical analysis of the drop evaporation process moving in a water stream through high-velocity products of combustion]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 9, pp. 17–23.
73. 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.
74. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye zakonmernostey ispareniya tonkoraspylennoy vody pri dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Experimental research of water mist evaporation regularities when moving through the high-temperature combustion products]. *Butlerovskiye soobshcheniya — Butlerov Communications*, 2013, vol. 35, no. 9, pp. 38–46.
75. Isaev S. A., Baranov P. A., Prigorodov Yu. S., Sudakov A. G., Usachov A. Ye. Chislennyy analiz vliyaniya szhimayemosti na turbulentnoye, simmetrichnoye obtekaniye vyazkim gazom tsilindra s krugovoy vikhrevoy yacheykoy [Numerical analysis of the influence of the compressibility of a viscous gas on its turbulent flow around a cylinder with a circular vortex cell]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2008, vol. 81, no. 2, pp. 351–358.
76. Kuznetsov G. V., Sheremet M. A. Matematicheskoye modelirovaniye slozhnogo teploperenosa v zamknutoy pryamougolnoy oblasti [Mathematical modelling of complex heat transfer in a rectangular enclosure]. *Teplofizika i aeromekhanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2009, vol. 16, no. 1, pp. 119–128.

77. Isaev S. A., Lysenko D. A. Testirovaniye chislennykh metodov, konvektivnykh skhem, algoritmov approksimatsii potokov i setochnykh struktur na primere sverkhzvukovogo techeniya v stupenchatom kanale s pomoshchyu paketov CFX i FLUENT [Testing of numerical methods, convective schemes, algorithms for approximation of flows, and grid structures by the example of a supersonic flow in a step-shaped channel with the use of the CFX and FLUENT packages]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2009, vol. 82, no. 2, pp. 321–326.
78. Strizhak P. A. Vliyaniye raspredeleniya kapel v “vodyanom snaryade” na temperaturu i kontsentratsiyu produktov sgoraniya v yego slede [Influence of droplet distribution in a “water slug” on the temperature and concentration of combustion products in its wake]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 4, pp. 895–904.
79. Strizhak P. A. Chislennyy analiz diffuzionno-konvektivnykh protsessov teplomassoperenosa pri dvizhenii kapel vody cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Numerical analysis of diffusion and convection heat and mass transfer processes at the moving of water drops through high combustion products]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 7, pp. 11–21.
80. Strizhak P. A. Influence of droplet distribution in a “water slug” on the temperature and concentration of combustion products in its wake. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 4, pp. 895–904. doi: 10.1007/s10891-013-0909-9.
81. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye zakonornostey ispareniya tonkoraspylennoy vody pri dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Experimental research of evaporation regularities for pulverized water moving through high-temperature combustion products]. *Butlerovskiy soobshcheniya — Butlerov Communications*, 2013, vol. 35, no. 9, pp. 38–46.
82. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. O nekotorykh fizicheskikh zakonornostyakh ispareniya raspylennoy vody pri dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [About some physical regularities of the sprayed water evaporation when moving through high-temperature combustion products]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 2, pp. 201–207.
83. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye izmeneniya massy kapel vody pri ikh dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Experimental study of the change in the mass of water droplets in their motion through high-temperature combustion products]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 6, pp. 1413–1418.
84. Shumikhin A. A., Karpov A. I., Korepanov M. A., Novozhilov V. B. Chislennoye issledovaniye vozdeystviya tonkoraspylennoy vody na turbulentnoye diffuzionnoye plamya [Numeric simulation of the water mist effect on the turbulent diffusion flame]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya — Chemical Physics and Mesoscopy*, 2012, vol. 14, no. 3, pp. 391–400.
85. Vysokomornaya O. V., Markov A. O., Nazarov M. N., Strizhak P. A., Yanov S. R. Chislennoye issledovaniye vliyaniya usloviy raspyleniya vody na temperaturu v slede “vodyanogo snaryada” [Numerical research of influence of water dispersion conditions on temperature in “water shell” trace]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 24–31.
86. 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. 62–68.
87. Isachenko V. P. *Teploobmen pri kondensatsii* [Heat exchange at condensation]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 239 p.
88. Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Heat and mass transfer in the process of movement of water drops in a high-temperature gas medium. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 1, pp. 62–68.
89. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Vliyaniye formy kapli vody na rezultaty matematicheskogo modelirovaniya yeye ispareniya pri dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Influence of water droplet shape on the mathematic simulation results of its evaporation when moving through the high-temperature combustion products]. *Teplovyye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Equipment*, 2013, no. 6, pp. 254–261.
90. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Otsenka effektivnosti ispolzovaniya teploty ispareniya vody pri tushenii lesnykh pozharov [Evaluation of efficiency using water evaporation heat at the forest fire quenching]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 9, pp. 57–63.

91. Gnezdilov N. N., Kozlov I. M., Dobrego K. V. Matematicheskoye modelirovaniye goreniya torfyanogo sloya. Vliyaniye kondensatsii parov vody [Mathematical simulation of the combustion of a peat bed. Influence of steam condensation]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 58, no. 5, pp. 1066–1075.
92. Goreshnev M. A., Kazarin A. N., Lopatin V. V., Sekisov F. G., Smerdov O. V. Kombinirovannyi metod sushki drevesiny [Combined timber drying method]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 2, pp. 336–339.
93. Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Chislennoye issledovaniye ispareniya plenki vody na poverkhnosti lesnogo goryuchego materiala [Numerical investigation of water film evaporation on the surface of forest fuel], *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 6, pp. 18–25.
94. Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Chislennoye issledovaniye fiziko-khimicheskikh protsessov pri isparenii vody v porakh pri poverkhnostnogo sloya lesnogo goryuchego materiala [Numerical investigation of physicochemical processes occurring during water evaporation in the surface layer pores of a forest combustible material]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 4, pp. 773–781.
95. Joseph P., Nichols E., Novozhilov V. A comparative study of the effects of chemical additives on the suppression efficiency of water mist. *Fire Safety Journal*, 2013, vol. 58, pp. 221–225. doi: 10.1016/j.firesaf.2013.03.003.
96. Zhou X., D'Aniello S. P., Hong-Zeng Yu. Spray characterization measurements of a pendent fire sprinkler. *Fire Safety Journal*, 2012, vol. 54, pp. 36–48. doi: 10.1016/j.firesaf.2012.07.007.
97. Yoshida A., Udagawa T., Momomoto Y., Naito H., Saso Y. Experimental study of suppressing effect of fine water droplets on propane/air premixed flames stabilized in the stagnation flowfield. *Fire Safety Journal*, 2013, vol. 58, pp. 84–91. doi: 10.1016/j.firesaf.2013.01.025.
98. Korobeynikov O. P., Shmakov A. G., Chernov A. A., Bolshova T. A., Shvartsberg V. M., Kutsenogiy K. P., Makarov V. I. Tusheniye pozharov s pomoshchyu aerorozley rastvorov soley [Fire suppression by aerosols of aqueous solutions of salts]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2010, vol. 46, no. 1, pp. 16–20.
99. Volkov R. S., Zhdanova A. O., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye integralnykh kharakteristik ispareniya tipichnykh raspylennykh tushashchikh zhidkostey pri ikh dvizhenii cherez plamya [Experimental investigation of integral evaporation characteristics of the typical atomized extinguishing liquids when moving through a flame]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti — Safety of Work in the Industry*, 2013, no. 12, pp. 33–37.
100. Volkov R. S., Zabelin M. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Vliyaniye tverdykh vkluyucheny v kaplyakh zhidkosti na intensivnost paroobrazovaniya v zone plameni [Influence of solid inclusions in liquid drops on evaporation intensity in the flame]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 5, pp. 10–17.