

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

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)

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)

А. Е. КУЗНЕЦОВ, канд. техн. наук, начальник отдела, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143912, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: ae.kuznetsov@yandex.ru)

Е. А. МОСКВИЛИН, канд. техн. наук, начальник сектора, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143912, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: moskvilin-ru@mail.ru)

УДК 614.842.61:536.4

О РОЛИ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ

Дан анализ эффективности применения современных распылительных устройств, используемых при тушении типичных пожаров. Рассмотрены физические особенности процессов ликвидации пожаров с использованием различных распылительных устройств и систем. Выделены характерные закономерности распыления тушащих средств с использованием авиации. Рассмотрены перспективные направления развития распылительных устройств для систем пожаротушения.

Ключевые слова: вода; капли; пароводяной поток; испарение; пламя; пожары; тушение.

Введение

В 2009 г. в России пожарами уничтожены площади, сопоставимые с теми, на которых могли бы проживать 130 тыс. чел. [1]. При этом на долю городских пожаров, как правило, приходится около 70 % всех пожаров, происходящих в России [2]. Одним из самых значимых неблагоприятных экологических последствий пожаров является загрязнение “воздушного бассейна” [2–7].

Современные этапы развития человечества сопровождаются быстрым ростом производительности и количества техногенных объектов [8]. В результате отклонения параметров производственных процессов от нормативных (вследствие износа оборудования, человеческого фактора и других причин) в коммунально-бытовой сфере и на предприятиях могут возникать аварии, пожары или взрывы [8, 9]. Материалы, используемые в производственной сфере, чрезвычайно разнообразны по своему химическому составу [8], поэтому пожары, происходящие в промышленном секторе, имеют серьезное влияние на окружающую среду [8].

Наибольший ущерб от пожаров и взрывов отмечен в сфере энергетики [10], а также на объектах нефтегазодобычи и переработки нефти. В период с ноября 2001 по май 2004 гг. в горнопромышленном комплексе произошло 57 аварий [11] (рис. 1). При этом необходимо отметить, что аварии на промышленных объектах порождают возможность негативного воздействия на людей и окружающую природную среду [8] и, как следствие, являются одной из основных причин экологического риска.

Летом 2010 г. природными пожарами были охвачены почти 22 субъекта Российской Федерации [12], полностью уничтожены огнем 127 населенных объектов [12]. Тяжелое засушливое лето 2010 г. во многом схоже с летом 1938 г., когда в Удмуртской Республике выгорели не только леса, но и несколько населенных пунктов [13].

В государственном докладе о состоянии защиты населения и территорий России от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера за 2012 г. отмечалась сложная лесопожарная обстановка в ряде субъектов страны [14]. По сведениям [14]

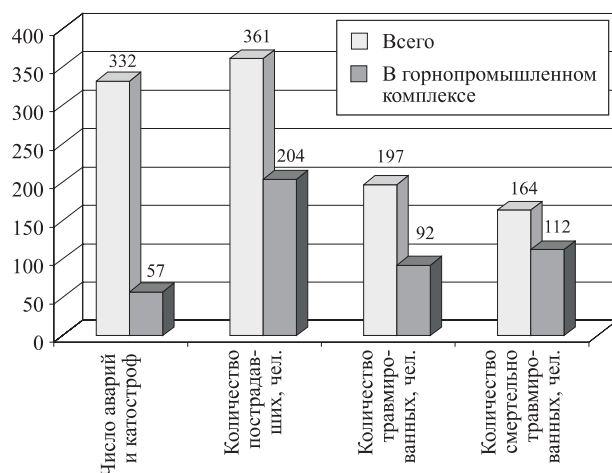


Рис. 1. Диаграмма аварийности и травматизма на предприятиях, подконтрольных Госгортехнадзору РФ, за период 11.2001–05.2004 гг. [11]

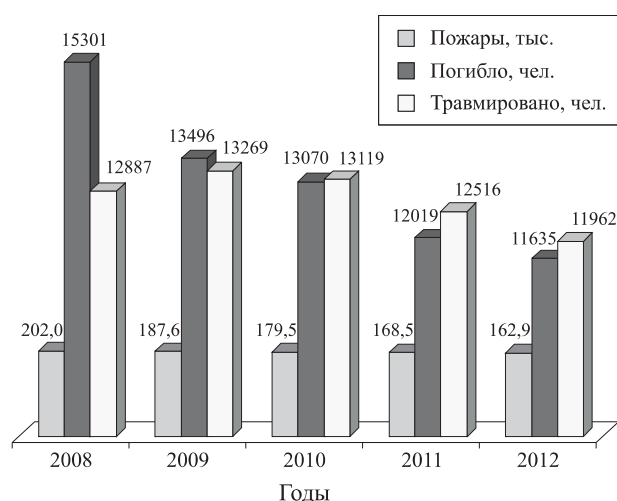


Рис. 2. Диаграмма распределения количества пожаров и их последствий за период 2008–2012 гг. [14]

в 2012 г. на территории России произошло 20,2 тыс. лесных пожаров. Из общего количества лесных пожаров 43,8 % произошли по вине граждан [14]. По сравнению с 2011 г. площадь земель, охваченная лесными пожарами, увеличилась на 692,8 тыс. га [14].

Несмотря на устойчивую положительную динамику снижения числа пожаров (городских и лесных) с 2008 по 2012 гг. (рис. 2), одним из приоритетных направлений в области обеспечения комплексной безопасности объектов инфраструктуры промышленного и социально-бытового назначения является оснащение их системами мониторинга для обеспечения безопасности от угроз природного и техногенного характера [14]. Одна из ключевых задач состоит в повышении эффективности существующих и разработке новых способов пожаротушения. Последнее существенно зависит от эффективности работы непосредственно распылительных устройств и систем.

Современные технологии распыления тушащих жидкостных составов

Применение вертолетов для тушения пожаров в условиях городской застройки не является единичным случаем (особенно в последние годы [15]). В то же время в [15] установлено, что типичное выливание воды из подвесной емкости вертолетной техники на крыши горящих зданий сопровождается ущербом, который сопоставим с самим пожаром.

При тушении пожаров непосредственно внутри зданий и сооружений практически не применяется авиация. В таких случаях, как правило, используется, например, способ тушения жидкостными составами с применением стационарных (спринклерных или дренчерных) установок или мобильных технических средств (пожарных машин, реже вертолетов) [16], имеющих трубопроводное соединение с источниками огнетушащих веществ (резервуар) и распылительные головки. Подача огнетушащего вещества в очаг пожара может осуществляться через вскрытый оконный проем (что характерно для мобильных технических средств) [16]. Причем уже использованное тушащее жидкое вещество собирается, фильтруется и вновь подается в резервуар или в систему пожарного водоснабжения здания для повторного применения [16].

Подача огнетушащего вещества при тушении лесных пожаров и пожаров в высотных зданиях [17] осуществляется при помощи одного или нескольких вертолетов, соединенных между собой гибкими шлангами [17]. Чтобы избежать наматывания шланга на винт и лопасти вертолета, на любую неподвижную часть его крепится труба с отверстиями для фиксации шланга [17].

Для тушения лесных пожаров активно применяются авиационные методы [18–20]. Становление авиационной службы по охране лесов началось в конце 30-х гг. XX столетия [21], а уже к началу 80-х гг., например, в Байкальском регионе лесной авиации принадлежали ведущие позиции в деле обнаружения пожаров и борьбы с ними [21].

Известны результаты экспериментальных исследований по тушению лесных пожаров осадками, искусственно вызываемыми из мощных кучевых облаков, для чего применяется легкомоторная авиация [22].

Известны также результаты анализа использования авиации для сбора информации об обстановке на месте лесного пожара и передачи ее пожарным командам в процессе его тушения [20]. Кроме того, рассматриваются основные проблемы и перспективы внедрения беспилотных систем, а также тенденции развития беспилотной авиации микро- и мини-классов [20].

Эффективность применения авиации при тушении крупных лесных пожаров довольно часто оце-

нивается на основе результатов как численных, так и экспериментальных исследований. Например, в [23] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований параметров сброса воды самолетом Ил-76 МД, оборудованным выливным авиационным прибором. Проведена оценка пространственного и поверхностного распределения сбрасываемой жидкости в диапазоне летно-технических характеристик самолета Ил-76 [23]. Исследован дисперсный состав капель воды, достигающих поверхности земли [23].

Особое внимание уделяется, как правило, конструкциям вертолетов, используемых для пожаротушения [24–28]. Применение на практике способа, описанного в [24], обеспечивает увеличение скорости струи огнетушащего вещества (ОТВ). При этом повышаются ее тушащие свойства, что делает возможным более глубокое проникновение струи внутрь горящего слоя. Вертолетное устройство пожаротушения [24] снабжено дополнительным соплом, установленным на конце выносной штанги и связанным с источником подачи воздуха. При этом внутри дополнительного сопла размещен поворотный ствол и, по крайней мере, один вертикальный пожарный ствол, направленный вниз и установленный внутри ометаемой площади винта [24]. Применение нескольких вертикальных стволов позволяет дополнительно создать “защитную рубашку” из струи ОТВ, что существенно увеличивает ее диаметр [24].

Для тушения лесных пожаров предложен способ, предусматривающий применение вертолетов с соосно вращающимися винтами (типа КА), создающими мощнейший нисходящий поток воздуха [25]. Для реализации данного способа [25] вертолет подцепляет специальный конический корпус с соответствующими устройствами (рис. 3). Мощный нисходящий поток воздуха от вертолета [25] в виде смерча, устремляясь через конический корпус, сдувает и гасит пламя на своем пути. Использование данного способа [25] позволяет сэкономить значительное количество топлива за счет двойного использования мощности вертолета. Кроме того, отпадает необходимость в челночных рейсах [25], что также является преимуществом данного способа.

Применение способа [26] позволяет повысить эффективность процесса тушения лесных пожаров при минимально возможных временных затратах. Этот способ предусматривает оснащение вертолета емкостью для воды и специализированным приспособлением для ее подачи в очаг возгорания. Емкость соединяется гибким шлангом с нагнетательным патрубком насоса на передвижном оборудовании, с помощью которого она заполняется водой [26]. Высокая эффективность процесса тушения достигается

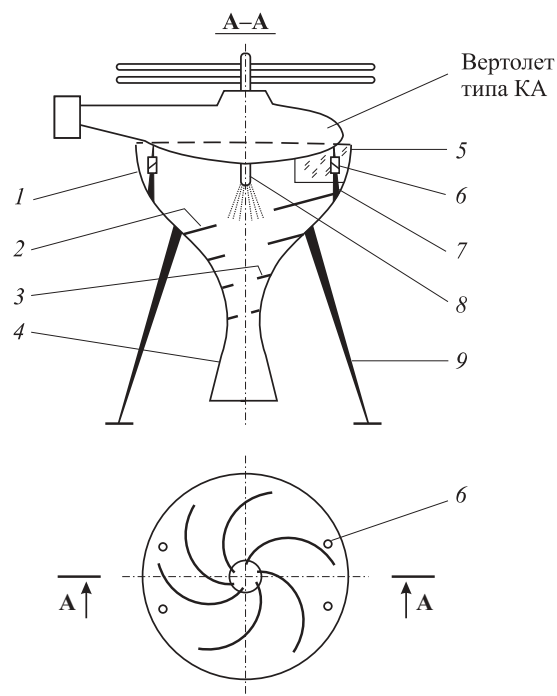


Рис. 3. Схема устройства “Смерч” для тушения пожаров [25]: 1 — верхняя собирающая круглая стенка корпуса; 2 — спираль для закручивания воздуха; 3 — спираль для закручивания воздуха в сужающейся части корпуса; 4 — сопло Лавала; 5 — прозрачная часть стенки корпуса для обзора местности; 6 — автосцепка; 7 — стойка с нижней частью автосцепки; 8 — поддерживающие корпус стойки

при ограниченном числе используемого для пожаротушения оборудования [26].

Способом, предложенным в [27], предусматривается размещение в фюзеляже противопожарного вертолета резервуаров с ОТВ и устройства для выпуска тушащей жидкости под давлением. В основном резервуаре установлена ограничительная пластина, которая может вертикально перемещаться по неподвижным направляющим [27]. Головная часть фюзеляжа вертолета горизонтально разделена на верхний отсек с кабиной экипажа и нижний отсек для оператора, который управляет устройством выпуска жидкости, находящимся в передней части нижнего отсека [27].

Для объектов, расположенных вдали от водоемов, предложен способ пожаротушения без использования воды [28]. Вертолет для тушения пожара оснащен компрессором с ресивером для сжатого воздуха, соединенным через воздушную заслонку с воздушным рукавом [28]. На конце последнего установлена емкость из огнестойкого материала с ОТВ, которая снабжена сифонной трубкой и воздушным соплом, связанным с емкостью через импульсный клапан с дистанционным управлением. Клапан обеспечивает создание многократно повторяющихся кратковременных взрывных выхлопов сжатого воздуха

с впрыснутыми в него порциями диспергированного тушащего вещества [28].

Известны также результаты анализа возможности повышения эффективности тушения пожаров за счет улучшения огнетушащих свойств “мелкораспыленной” или тонкораспыленной воды [29]. Степень однородности отрицательно заряженных капель воды оптимального размера повышается вдвое при предварительной обработке воды постоянным магнитным полем [29]. Изменение некоторых физических параметров воды (вязкость, теплота испарения, поверхностное натяжение и т. п.) под воздействием магнитного поля происходит вследствие нарушений связей между молекулами и перестройки структуры воды, что положительно влияет на процесс ликвидации пламени [29]. Отрицательно заряженные капли воды в потоке притягиваются положительно заряженным фронтом пламени, что обеспечивает более глубокое проникновение их в зону горения [29].

Кроме того, можно отметить способ получения тонкораспыленной воды в специально разработанном модульном устройстве для тушения пожара в замкнутых объемах [30].

Вопросам исследования пожаротушения тонкораспыленной водой посвящено достаточно много работ. Можно выделить труды научных коллективов, и в частности их сотрудников: Н. П. Копылова, И. И. Петрова, А. Л. Чибисова, С. Г. Цариченко, Д. В. Полякова, Ю. С. Еремина [31, 32], Е. А. Кудрявцева, А. С. Чирко, А. Л. Душкина, В. В. Матушкина, А. В. Карпышева, С. Е. Ловчинского, Н. Н. Рязанцева [33–35], Д. А. Корольченко, В. Ю. Громового, О. О. Ворогушина [36–38], Динь Конг Хынга, А. Я. Корольченко, А. С. Охроменко [39], В. Н. Семенова, С. И. Кочнева, М. Д. Сегаль [40, 41], В. В. Соковикова, А. Н. Тугова, В. В. Гришина, В. Н. Камышева [42], В. И. Гергель, А. Ю. Андрюшкина, М. Т. Пелеха, О. С. Кочетова, М. О. Старевой [43–45].

Известны результаты исследований особенностей и закономерностей процессов пожаротушения тонкораспыленной водой [43, 35]. Так, например, в [43] представлены способы формирования высокодисперсных капель и их транспортирования в очаг горения, а также способ формирования тонкораспыленной струи распылением воды в высокоскоростном газовом потоке. Экспериментальные исследования [35] характеристик струй тонкораспыленной воды при жидкостном и газожидкостном способах распыления показали возможность использования тонкораспыленной воды при локальном и объемном пожаротушении [35].

Известны результаты анализа применения тонкораспыленной воды для тушения пожара в разных по функциональному назначению высотных зданиях [38, 46]. В [38] обоснована возможная эффектив-

ность использования системы пожаротушения тонкораспыленной водой. Применение предложенного в [46] способа предполагает распыление воды равномерно по всему объему помещения с орошением стен и всех поверхностей находящихся в нем объектов. Последующие импульсные подачи осуществляются в случае возобновления пожара.

Предлагаемая в способе тушения пожаров распыленной водой технология [47], помимо противопожарной обороны (рис. 4), может быть использована в технологических целях, например для покрытия жидкостью больших площадей с равномерным распределением ее по поверхности. Поток струи распыленной воды из сопла распылителя формируется разбиением ее послойно на пленочные потоки посредством “тарелочек” [47]. Затем эти пленочные потоки растягиваются за счет увеличения площади поверхности каждой тарелочки и под действием скоростного напора дробятся на капли, что позволяет получать широкий угол раскрытия распыленной струи воды и, следовательно, большую площадь орошения при равномерном распределении ее по поверхности [47]. Проведенные исследования показали [47], что для ликвидации возгораний твердых веществ наиболее эффективна вода с размером капель порядка 300–600 мкм, а при тушении жидких нефтепродуктов или других горючих жидкостей — 50–150 мкм. Указанные диапазоны размеров капель соответствуют тонкораспыленной воде.

Можно выделить также способы тушения пожаров, заключающиеся в подаче струи распыленной воды непосредственно на горящую поверхность [48, 49]. Струя формируется с переменной по сечению дисперсностью с таким расчетом, чтобы в центральные области очага горения направлялась часть струи с наименьшей дисперсностью, а в периферийные — с наибольшей. При этом изменение дисперсности по сечению струи происходит равномерно [48, 49], а телесный угол ее факела уменьшается до минимального размера. Таким образом, при использовании предлагаемых способов тушения [48, 49] орошаемая поверхность горения охлаждается равномерно, что позволяет ликвидировать горение за относительно короткий интервал времени.

Известны способы повышения эффективности технологий пожаротушения, в которых за счет добавления в воду солей и иных специализированных примесей, а также предварительного нагрева воды обеспечивается повышение огнетушащих свойств жидкостей [50–53]. В соответствии со способом, описанным в [50], в очаг горения подают водный раствор солей калия в виде объемного аэрозольного потока с размером частиц 5–80 мкм. Отличительной особенностью способа, предложенного в [51], является подача в зону горения под давлением распы-

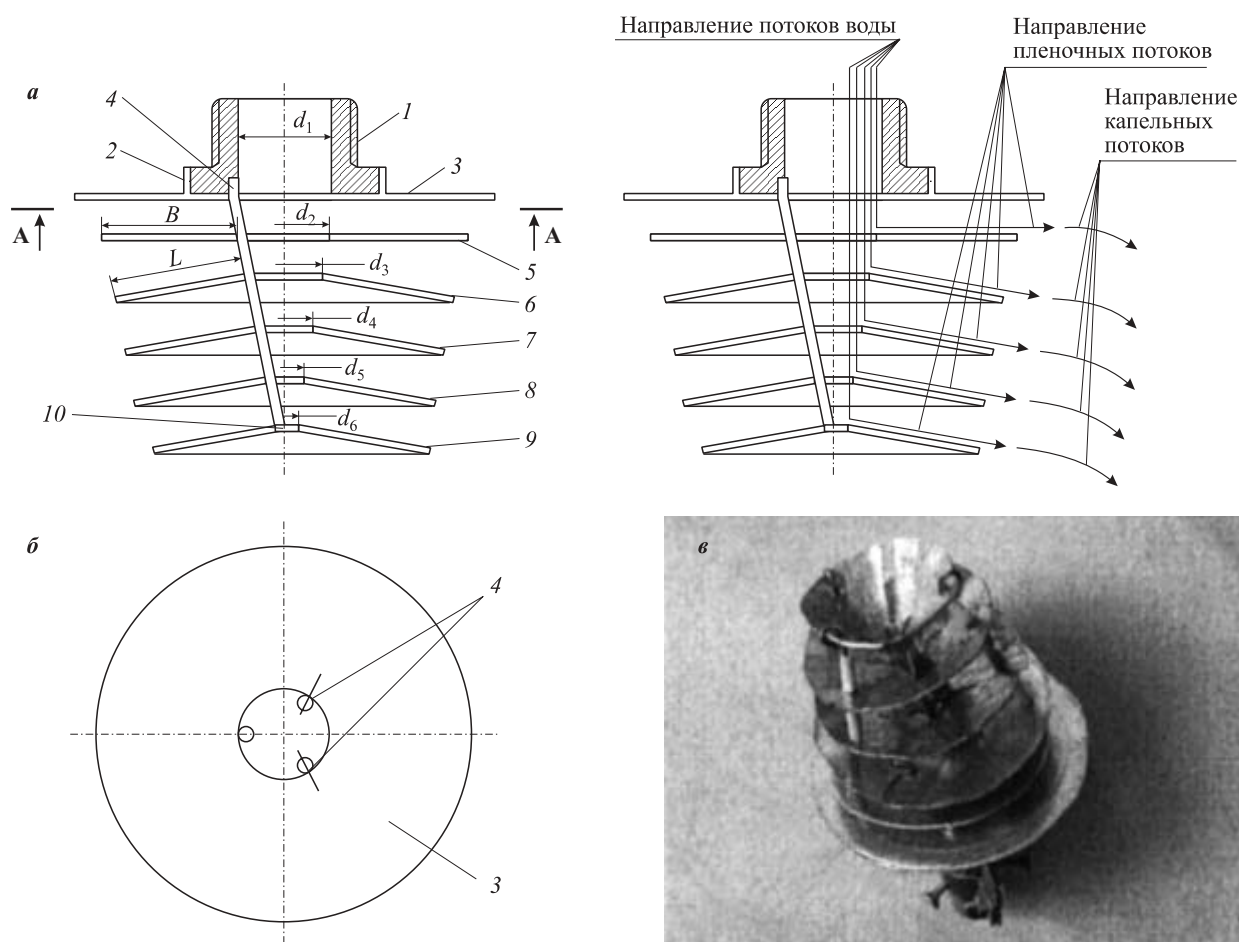


Рис. 4. Схема устройства для создания потока тонкораспыленной воды со схемой распределения направлений потоков воды (а), поперечное сечение устройства между отбойником и первой тарелочкой (б), макет тарелочного распылителя (в) [47]: 1 — сопло; 2 — каркас; 3 — отбойник; 4 — спицы; 5 — тарелочка в виде плоского круглого диска с отверстием-диафрагмой в центре диска; 6–9 — тарелочки в виде усеченного конуса; 10 — доньшко тарелочки 9; B — толщина кольца первой тарелочки 5; L — образующая тарелочек в виде усеченного конуса ($L = B$); d_1 — диаметр входного отверстия; d_2 – d_6 — диаметры отверстий-диафрагм тарелочек 6–9 соответственно

ленной воды, насыщенной до предельной растворимости солью, ингибирующей горение. Проведена также экспериментальная оценка [52] применения метода, основанного на анализе частиц солевого остатка, сформированного в результате испарения капель при распылении модельных водных растворов NaCl. Важно подчеркнуть, что объемная подача капельного потока в очаг горения при реализации полидисперсного распыления воды [31] позволяет повысить ее огнетушащую способность за счет оптимального соотношения мелких и крупных капель в потоке, доставляемом в очаг горения. Установлено, что повышению огнетушащей способности воды способствует также добавление в нее веществ, имеющих щелочную природу [31].

В особо сложных случаях тушения пожаров для обеспечения расширения возможностей пожарной техники используют терморазогрев воды до экстремальной температуры [54]. Вначале вода предварительно нагревается путем пропускания ее через нагревательное устройство, а затем подается в очаг

возгорания [54]. Мощная длинная струя дает возможность тушить очаг возгорания со значительно-го расстояния. В способе, представленном в [55], вставка для подогрева воды, имеющая горелку, позволяет достичь нагрева воды до температуры, которая обеспечивает не только ликвидацию возможного обледенения рукава, но и подачу воды в очаг пожара с температурой не ниже 120 °С (что позволяет выполнять пожаротушение в зонах с пониженными температурами окружающей среды). Специфика тушения пожара заключается в образовании пара в зоне горения (при подаче перегретой воды) [55].

В [56] исследованы процессы нагрева и испарения одиночной капли жидкости. Приведено сравнение результатов расчетов с известными данными измерений для двух жидкостей (вода и ацетон) с существенно отличающейся скоростью испарения при разных температурах и влажности окружающей среды, а также скорости набегающего потока. Получено удовлетворительное согласие расчетных и опытных данных, таких как среднееобъемная температура, диа-

метр и скорость осаждения капель (крупнодисперсных (1–3 мм) и мелкодисперсных (0,04–0,06 мм)).

Анализ современных технологий распыления жидкостных составов позволяет сделать заключение о многообразии способов подачи последних при ликвидации пожаров. Однако применение каждого из предложенных способов позволяет решать довольно ограниченный круг задач. В рассмотренных способах пожаротушения акценты делаются, как правило, на методы распыления жидкостных тушащих составов, реализацию локального сброса больших масс воды, использование мощности нисходящего потока воздуха. Кроме того, большое внимание уделяется улучшению свойств ОТВ, применяемых для тушения и ликвидации пожаров. Одной из основных задач при повышении эффективности реализации рассмотренных способов и устройств пожаротушения является экономия тушащих жидкостных составов. Избыточная подача тушащей жидкости не только отрицательно влияет на результат ликвидации возгораний, но и влечет за собой большой материальный ущерб (сопоставимый с ущербом от пожара).

Перспективные технологии распыления жидкостных тушащих составов

Одной из наиболее перспективных технологий тушения пожаров можно считать применение полидисперсных пароводяных потоков. Численные [57–75] и экспериментальные [76–91] исследования процесса испарения капель типичных водяных флегматизаторов горения в процессе движения их через продукты сгорания позволили установить оптимальные (с точки зрения полного испарения) размеры капель для разных высот пламени. В [57] установлено, что для эффективного вытеснения продуктов сгорания водяными парами и снижения температуры в зоне горения следует измельчать капли воды до характерных размеров менее 1 мм. Например, для тушения пожаров при высоте помещения до 3 м [57] размеры капель не должны превышать 300 мкм. В [58] выявлено существенное влияние предшествующих капель на интенсивность испарения последующих при движении через высокотемпературные газы. Установлено также, что масштабы этого влияния определяются расстояниями между последовательно движущимися каплями (рис. 5).

Результаты численного моделирования [64, 65] показали, что для эффективного снижения температуры в следе “водяного снаряда” (большой совокупности сбрасываемых в зону горения водяных капель) целесообразно последовательное и параллельное распыление капель. Выявлено также [64], что при возрастании массы воды, используемой для тушения пожара, необходимо существенно увеличивать расстояния между соседними каплями, что

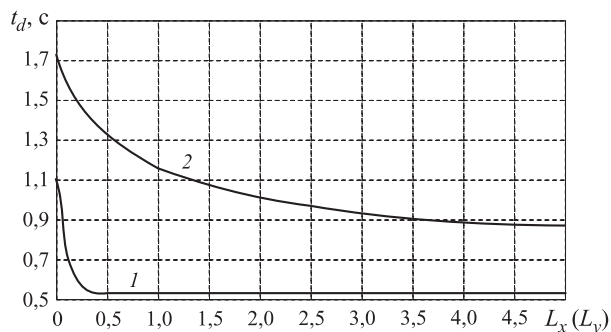


Рис. 5. Зависимость времени полного испарения капель воды от параметров L_x и L_y при $H_d = 0,5$ мм, $L_d = 1$ мм: 1 — $t_d = f(L_x)$ при $L_y = 70$; 2 — $t_d = f(L_y)$ при $L_x = 1$ [58]

позволит повысить эффективность использования тушащей жидкости. Численные исследования влияния условий распыления и структуры струи воды на температуру и концентрацию продуктов сгорания в зоне ее действия позволили установить несколько важных соотношений [70]. В частности, определены значения параметров, характеризующих расположение капель в струе, при котором достигаются минимальные температуры и концентрации продуктов сгорания в зоне распыления в условиях максимально возможной полноты испарения воды. В [71] установлены интегральные характеристики испарения капель воды при прохождении через высокотемпературные продукты сгорания.

Результаты численных исследований [72] показали, что менее 1 % жидкости “водяного снаряда” испаряется при его движении в зоне пламени с высокой температурой (около 1100 К). Экспериментальные исследования позволили установить параметры распыления воды, при которых обеспечивается практически полное ее испарение [81, 82]. Кроме того, экспериментально исследовано влияние начальной скорости движения капель распыленной воды на интегральные характеристики испарения в области высокотемпературных продуктов сгорания [83–85]. Установлено, что изменение скоростей движения капель воды в типичном для практики диапазоне 0,5–2 м/с незначительно влияет на интенсивность испарения воды [84]. В связи с этим в типичных распылительных системах основное внимание следует уделять размерам и концентрации капель в струе воды.

Экспериментальные исследования [86, 87, 89] позволили установить (с использованием высокоскоростной измерительной системы) интегральные характеристики испарения (размеры, масса, концентрация) капель пресной воды и воды с типичными примесями солей. В [87] определено влияние содержания в тушащей жидкости примесей солей на полноту ее испарения.

На рис. 6,а и 6,б показано, что при прохождении распыленной жидкостью высокотемпературной

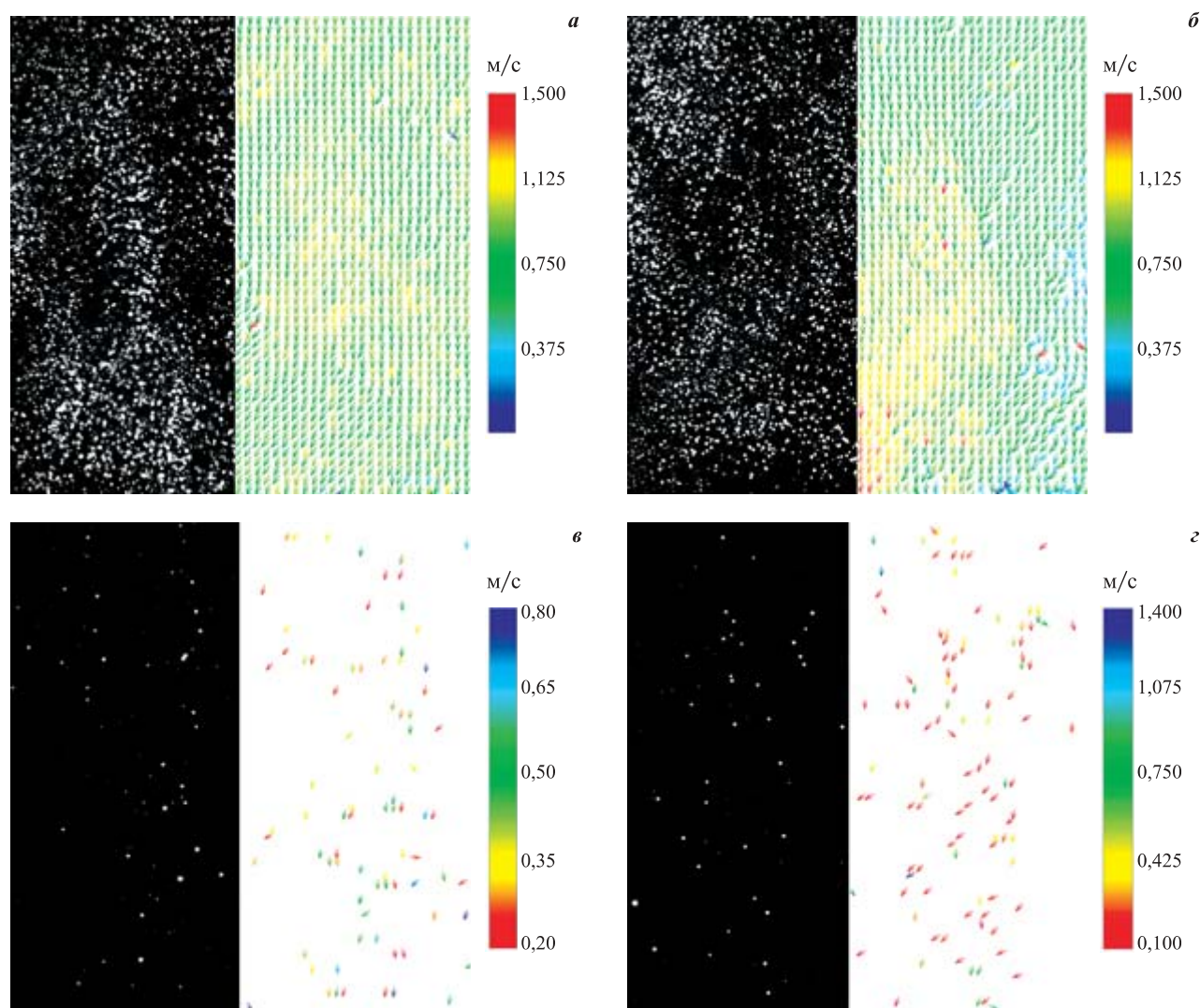


Рис. 6. Видеogramмы и поля скоростей «трассирующих» частиц жидкости: *а, б* — на входе в канал соответственно составов 1 (H_2O — 99,5 %, TiO_2 — 0,5 %) и 2 (H_2O — 97 %, TiO_2 — 0,5 %, NaCl — 2,5 %); *в, г* — на выходе из канала соответственно составов 1 и 2 [87]

зоны пламени наблюдается значительное снижение общей концентрации капель относительно начальной (рис. 6, *а* и 6, *б*), что говорит о достаточно высокой скорости их испарения [87]. Установлено [89, 90], что при малых размерах капель воды присутствие солей (относительная массовая концентрация от 0 до 10 %) незначительно влияет на интенсивность парообразования в пламенной зоне горения и, соответственно, на эффективность тушения пожаров. Проанализировано также [90] влияние начальной температуры воды и концентрации в ней примесей солей на интенсивность ее испарения в зоне пламени при движении в виде достаточно крупных монолитных капель (средний радиус более 1 мм) и капель тонкораспыленной воды (средний радиус менее 0,35 мм). Кроме того, установлено [90], что предварительный нагрев воды на 30–40 К приводит к существенному (около 15–25 %) уменьшению массы жидкости в зоне пламени как для потоков тонкораспылен-

ной жидкости, так и для монолитных, достаточно больших капель.

В результате экспериментальных исследований [91] выявлено, что существенное влияние на процесс испарения капель при прохождении через высокотемпературные продукты сгорания оказывают различные инородные включения. На рис. 7 приведены типичные видеogramмы поведения одиночных капель воды (условный радиус $R_d = 3$ мм), содержащих твердые включения — углеродистые частицы размером от 50 до 500 мкм [91]. Из рис. 7, *б* и 7, *в* видно, что при размерах твердых включений $L_m > 200$ мкм частицы в форме неправильных многоугольников хаотичным образом ориентированы относительно друг друга, но достаточно равномерно распределены в каплях жидкости [91]. Это можно объяснить, в первую очередь, их перемещениями в каплях воды вследствие конвекции. При $L_m \leq 70$ мкм следует отметить достаточно равные удаления час-



Рис. 7. Видеogramмы каплей воды ($R_d = 3$ мм) с включениями углеродистых частиц: *а* — $L_m = 50 \div 70$ мкм; *б* — $L_m = 250 \div 300$ мкм; *в* — $L_m = 450 \div 500$ мкм; 1 — капля; 2 — углеродистые частицы [91]

тиц относительно друг друга и близкие формы последних (см. рис. 7, *а*) [91]. Исследованиями установлено [91], что для повышения эффективности использования воды в зоне пламени целесообразно специально вводить твердые включения в состав тушащей жидкости.

Рассмотренные в настоящей работе результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что избыточная подача тушащей жидкости в течение длительного времени позволит ликвидировать возгорание, но повлечет за собой высокий расход тушащих средств [72, 90], что является нецелесообразным. Установлено также, что измельчение капель воды до малых размеров может привести к их уносу высокотемпературными продуктами сгорания или к полному испарению [57, 84]. Следует учитывать и состав тушащей жидкости, в частности примеси и включения, так как их наличие может существенно влиять на процесс тушения [91]. Важны также не только состав и масса тушащей жидкости,

но и концентрация капель в газокapельном потоке, их размеры, расстояние между ними и другие, рассмотренные в настоящей работе факторы.

Заключение

В заключение можно сделать вывод о целесообразности использования при тушении пожаров полидисперсных парокapельных жидкостных смесей, состав и параметры капель которых можно варьировать в зависимости от высоты пламени, характерных температур и других характеристик пожара. В связи с этим можно предположить, что одним из важнейших перспективных направлений развития распылительных устройств и систем пожаротушения должна стать реализация подхода последовательно-параллельной подачи капель в зону горения.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дешевых Ю. И. За год пожары уничтожают в России целый город со всей инфраструктурой // Безопасность. Достоверность. Информация. — 2010. — № 89. — С. 10–11.
2. Гармышев В. В., Хисматулин С. Р., Тимофеева С. С. Загрязнение атмосферы от пожаров в городских муниципальных образованиях Сибирского федерального округа // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2013. — № 3 (74). — С. 48–53.
3. Брушлинский Н. Н., Исаева Л. К., Маринов С. И. Управление экологическим риском при пожарах // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 1992. — № 2. — С. 28–39.
4. Бурканов А. К., Егоров И. Г., Волохов В. В. Пожары: влияние на окружающую среду. Обзорная информация. — М.: ВНИИПО, 1992. — 18 с.
5. Гармышев В. В. Оценка экологического риска пожаров в городских агломерациях (на примере г. Иркутска): дис. ... канд. техн. наук. — Иркутск, 2003. — 155 с.
6. Исаева Л. К., Серков Б. Б. Экологические последствия загрязнения воздуха при пожарах в жилых зданиях // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 1992. — № 2. — С. 39–49.
7. Копылов Н. П., Рыжков А. М., Хасанов И. Р. Взаимодействие пожаров с атмосферой // Юбилейный сборник трудов Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны. — М.: ВНИИПО МВД России, 1997. — С. 137–157.
8. Аносова Е. Б., Кулайшин С. А. Проблемы оценки экологического риска пожаров и аварий на промышленных объектах // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. — 2013. — № 2 (24). — С. 92–94.
9. Исаева Л. К. Пожары и окружающая среда. — М.: Изд. Дом “Калан”, 2001. — 222 с.

10. Феоктистова О. Г. Некоторые вопросы мониторинга антропогенной опасности на предприятиях ГА // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. — 2008. — № 127. — С. 152–156.
11. Пахомов В. П., Рудакова Л. В. Техногенные катастрофы горнопромышленного характера // Экономика региона. — 2006. — № 2. — С. 23–36.
12. Царев В. А. Экономический ущерб, нанесенный природными пожарами в России в 2010 году // Лесотехнический журнал. — 2012. — № 3. — С. 147–155.
13. Орехов П. М. Борьба с лесными пожарами на территории Вавожского района Удмуртской Республики (исторический аспект) // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. — 2012. — № 3 (32). — С. 63–65.
14. Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2012 году. URL : http://www.mchs.gov.ru/activities/Grazhdanskaja_zashhita/Gosudarstvennij_doklad_o_sostojanii_zashh (дата обращения: 01.12.2014).
15. Семёнов В. Ю. Использование вертолетов при тушении пожаров в городских условиях // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. — 2012. — № 1. — С. 76–79.
16. Пат. 2470684 Российская Федерация. А62С 3/00 (2006.01). Способ тушения пожара в зданиях и сооружениях с закрытыми объемами / Гомонай М. В. — № 2011138847/12; заявл. 23.09.2011; опубл. 27.12.2012, Бюл. № 36.
17. Пат. 2392022 Российская Федерация. МПК А62С 3/02 (2006.01), В64Д 1/16 (2006.01). Способ тушения лесных пожаров и пожаров в высотных зданиях при помощи вертолетов / Абызбаев И. И. — № 2008133066/12; заявл. 11.08.2008; опубл. 20.06.2010, Бюл. № 17.
18. Москвиллин Е. А. Применение авиации для тушения лесных пожаров // Пожарная безопасность. — 2009. — № 1. — С. 89–92.
19. Лиджаков А. Ю., Решетский 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.
20. Коршунов Н. А., Котельников Р. В. Борьба с лесными пожарами: информационное обеспечение с помощью авиасредств // Пожарная безопасность. — 2008. — № 1. — С. 125–129.
21. Пашков К. И. Проблемы становления лесоохранной авиации в Байкальском регионе (конец 1930-х – 1980-е годы) // Известия Иркутской государственной экономической академии. — 2011. — № 4. — С. 231–233.
22. Козлов В. Н., Окунев С. М., Лихачев А. В., Щербаков А. П. Тушение лесных пожаров искусственно вызванными осадками // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. — 2003. — № 552. — С. 152–163.
23. 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. 2. — С. 391–392.
24. Пат. 2248916 Российская Федерация. МПК В64Д 1/18, А62С 27/00. Вертолет для борьбы с пожарами / Лебедев Ю. А., Лепешинский И. А., Орестов И. А., Михеев С. В., Касьянников В. А., Головин В. В. — № 2003119655/11; заявл. 03.07.2003; опубл. 27.03.2005, Бюл. № 9.
25. Пат. 2252050 Российская Федерация. МПК А62С 3/02. Способ тушения пожаров “Смерч” / Цой В. Ч. — № 2003127486/12; заявл. 10.09.2003; опубл. 20.05.2005, Бюл. № 14.
26. Пат. 2465936 Российская Федерация. МПК А62С 27/00 (2006.01). Способ тушения лесных пожаров и комплекс для его осуществления / Тарасов Ю. Д. — № 2011133755/12; заявл. 10.08.2011; опубл. 10.11.2012, Бюл. № 31.
27. Пат. 2347596 Российская Федерация. МПК А62С 31/28 (2006.01), В64Д 1/16 (2006.01), В64Д 33/04 (2006.01), В65Д 88/34 (2006.01). Противопожарный вертолет / Паяссис Р. — № 2005137371/11; заявл. 05.08.2004; опубл. 27.02.2009, Бюл. № 6.
28. Пат. 2451625 Российская Федерация. МПК В64Д 1/16 (2006.01). Вертолет для тушения пожара / Парамошко В. А. — № 2011116827/11; заявл. 27.04.2011; опубл. 27.05.2012, Бюл. № 15.
29. Пат. 2457877 Российская Федерация. МПК А62С 13/00 (2006.01), А62С 3/00 (2006.01). Способ тушения пожара мелкораспыленной водой / Крысов П. В., Ефремов С. Л., Пышный А. Р., Сахачкий С. Г. — № 2011105663/12; заявл. 15.02.2011; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 22.
30. Бондарь А. А., Решетов А. П., Иванов А. Ю. Математическое моделирование времени тушения пожаров тонкораспыленной водой по результатам эксперимента в замкнутых объемах // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2012. — № 1. — С. 82–88.

31. Пат. 2403927 Российская Федерация. МПК А62С 2/00 (2006.01), А62С 37/08 (2006.01). 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.
32. *Гергель В. И., Цариченко С. Г., Поляков Д. В.* Пожаротушение тонкораспыленной водой установками высокого давления оперативного применения // *Пожарная безопасность*. — 2006. — № 2. — С. 125–132.
33. *Чирко А. С., Карпышев А. В., Душкин А. Л., Матушкин В. В., Сегаль М. Д.* Повышение противопожарной защиты подземных объектов мегаполисов на основе передовых технологий генерации электробезопасных потоков тонкораспыленной воды // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. — 2006. — № 5. — С. 29–34.
34. *Душкин А. Л., Карпышев А. В., Сегаль М. Д.* Оптимизация параметров потоков тонкораспыленных огнетушащих веществ // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2010. — Т. 19, № 1. — С. 39–44.
35. *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.
36. *Корольченко Д. А.* Изменение характеристик горения горючей жидкости при тушении тонкораспыленной водой // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2012. — Т. 21, № 5. — С. 79–80.
37. *Корольченко Д. А., Громовой В. Ю., Ворогушин О. О.* Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // *Вестник МГСУ*. — 2011. — Т. 2, № 1. — С. 331–335.
38. *Корольченко Д. А., Громовой В. Ю., Ворогушин О. О.* Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2011. — Т. 20, № 9. — С. 54–57.
39. *Динь Конг Хынг, Корольченко А. Я., Охроменко А. С.* Пожаротушение тонкораспыленной водой в отсеках высотного здания // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2013. — Т. 22, № 3. — С. 63–66.
40. *Карпышев А. В., Душкин А. Л., Глухов И. С., Сегаль М. Д.* Использование тонкораспыленной воды для повышения противопожарной защиты атомных электростанций // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. — 2006. — № 5. — С. 34–44.
41. *Карпышев А. В., Душкин А. Л., Рязанцев Н. Н., Афанасьев А. А., Матушкин В. В., Сегаль М. Д.* Разработка высокоэффективного универсального огнетушителя на основе генерации струй тонкораспыленных огнетушащих веществ // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2007. — Т. 16, № 2. — С. 69–73.
42. *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.
43. *Андрюшкин А. Ю., Пелех М. Т.* Эффективность пожаротушения тонкораспыленной водой // *Проблемы управления рисками в техносфере*. — 2012. — Т. 21, № 1. — С. 64–69.
44. *Андрюшкин А. Ю., Пелех М. Т.* Получение тонкораспыленной воды газодинамическим распылением // *Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России*. — 2012. — № 1. — С. 53–58.
45. Пат. 2472552 Российская Федерация. МПК А62С 35/02 (2006.01). Установка для тушения пожара тонкораспыленной водой / Кочетов О. С., Стареева М. О. — № 2011142392/12; заявл. 20.10.2011; опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2.
46. Пат. 2370292 Российская Федерация. МПК А62С 3/00 (2006.01), А62С 35/02 (2006.01), А62С 27/00 (2006.01). Способ пожаротушения в помещениях и устройство для его осуществления / Барсуков В. Д., Басалаев С. А., Голдаев С. В., Минькова Н. П. — № 2007127397/12; заявл. 17.07.2007; опубл. 20.10.2009, Бюл. № 29.
47. Пат. 2415688 Российская Федерация. МПК А62С 31/00 (2006.01). Способ получения тонкораспыленной воды и устройство для его реализации / Петров И. И., Забегаев В. И. — № 2009149734/12; заявл. 30.12.2009; опубл. 10.04.2011, Бюл. № 10.
48. Пат. 1247019 СССР. МПК А62С 1/06. Способ тушения пожаров водой / Маслак В. Г., Королев Ю. С. — № 3840937/29-12; заявл. 09.01.85; опубл. 30.07.86, Бюл. № 28.
49. Пат. 1789234 СССР. МПК А62С 2/00. Способ тушения пожара распыленной водой / Маслак В. Г., Королев Ю. С., Пургин Б. А. — № 4847228/12; заявл. 03.07.90; опубл. 23.01.93, Бюл. № 3.
50. Пат. 2396095 Российская Федерация. МПК А62С 3/00 (2006.01). Способ тушения пожара / Коробейничев О. П., Шмаков А. Г., Чернов А. А., Куценогий К. П., Макаров В. И., Копылов С. Н., Баратов А. Н. — № 2009105727/12; заявл. 18.02.2009; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 22.
51. Пат. 2050866 Российская Федерация. МПК А62С 3/00. Способ тушения пожара и установка пожаротушения / Кононов Б. В., Пак З. П. — Заявл. 04.09.92; опубл. 27.12.95.

52. Ишиматов А. Н., Ворожцов Б. И. Метод исследования тонкодисперсного распыления жидкостей // Оптика атмосферы и океана. — 2012. — Т. 25, № 7. — С. 653–656.
53. Саламов А. А. Современная система пожаротушения “водяной туман” высокого давления // Энергетик. — 2012. — № 3. — С. 16–18.
54. Пат. 2372122 Российская Федерация. МПК А62С 5/00 (2006.01). Способ тушения пожаров и устройство для его осуществления / Каплан А. Л., Каришин А. В., Жуйков Д. А., Илюшин А. В. — № 2006130584/12; заявл. 24.08.2006; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 31.
55. Пат. 2030194 Российская Федерация. МПК А62С3 3/00. Устройство для тушения пожара перегретой водой / Роев В. В., Алешков М. В., Степанов К. Н., Пряничников В. А., Коровин Г. К., Шариков А. В., Нестеров В. М. — № 5067910/12; заявл. 06.10.92; опубл. 10.03.95.
56. Снегирёв А. Ю., Сажин С. С., Талалов В. А., Савин М. В. Апробация модели теплообмена и испарения капель диспергированной жидкости // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. — 2011. — Т. 2, № 122. — С. 48–59.
57. 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.
58. Стрижак П. А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 8. — С. 26–31.
59. 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. — № 8. — С. 86–94.
60. Стрижак П. А. Численный анализ процесса испарения капли, движущейся в струе воды через высокотемпературные продукты сгорания // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 9. — С. 17–22.
61. 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.
62. Глушков Д. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Численное исследование тепломассопереноса при движении “тангема” капель воды в высокотемпературной газовой среде // Тепловые процессы в технике. — 2012. — № 12. — С. 531–538.
63. 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.
64. 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.
65. 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.
66. 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.
67. 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.
68. 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.
69. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Оценка эффективности использования теплоты испарения воды при тушении лесных пожаров // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 9. — С. 57–63.
70. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние структуры распыленной воды на температуру и концентрацию продуктов горения // Пожарная безопасность. — 2013. — № 4. — С. 47–53.
71. 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.
72. Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Эффективность использования теплоты парообразования при воздействии “водяным снарядом” на пламя // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2013. — № 6. — С. 82–91.

73. Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Роль дисперсности воды, сбрасываемой авиацией в зону горения лесных массивов // Безопасность труда в промышленности. — 2014. — № 1. — С. 43–49.
74. Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние температуры в следе “водяного снаряда” на условия термического разложения типичного лесного горючего материала // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2014. — № 1. — С. 48–55.
75. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Numerical investigation of water droplets shape influence on mathematical modeling results of its evaporation in motion through a high-temperature gas // Mathematical Problems in Engineering. — 2014. — Article ID 920480. — 8 p.
76. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. The motion of a manifold of finely dispersed liquid droplets in the counter-flow of high temperature gases // Technical Physics Letters. — 2014. — Vol. 40, No. 6. — P. 499–502.
77. Высокоморная О. В., Захаревич А. В., Стрижак П. А. Экспериментальная оценка изменения размеров и скоростей движения капель воды при их перемещении в области высокотемпературных продуктов сгорания // Тепловые процессы в технике. — 2014. — Т. 6, № 5. — С. 214–220.
78. 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, No. 4. — P. 568–575.
79. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Анализ влияния начальной температуры распыленной воды на интегральные характеристики ее испарения при движении через зону “горячих” газов // Инженерно-физический журнал. — 2014. — Т. 87, № 2. — С. 436–444.
80. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование влияния начальной температуры распыленной воды на интенсивность ее испарения при движении через пламя // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 3. — С. 12–21.
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. Особенности испарения двух капель воды, движущихся последовательно через высокотемпературные продукты сгорания // Теплофизика и аэромеханика. — 2014. — Т. 21, № 2. — С. 269–272.
83. Волков Р. С., Забелин М. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние начальной скорости движения капель распыленной жидкости на интенсивность их испарения в области высокотемпературных продуктов сгорания // Безопасность труда в промышленности. — 2014. — № 3. — С. 35–40.
84. Волков Р. С., Забелин М. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние размеров и скоростей ввода капель воды в зону горения на эффективность ее использования при тушении пожаров в помещениях // Тепловые процессы в технике. — 2014. — № 4. — С. 157–163.
85. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование полноты испарения распыленной воды при ее движении через пламя // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 10. — С. 15–24.
86. 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.
87. 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.
88. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние начальных параметров распыленной воды на характеристики ее движения через встречный поток высокотемпературных газов // Журнал технической физики. — 2014. — Т. 84, № 7. — С. 15–23.
89. 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.
90. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование влияния начальной температуры воды и содержания в ней примесей солей на интенсивность испарения в зоне пламени при подаче в виде крупных монолитных капель и тонкораспыленной струи // Пожарная безопасность. — 2014. — № 2. — С. 93–98.
91. 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 8 декабря 2014 г.

ABOUT THE ROLE OF ATOMIZING DEVICES UNDER THE EXTINGUISHING OF FIRES

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

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)

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

KUZNETSOV A. E., Candidate of Technical Sciences, Head of Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143912, Russian Federation; e-mail address: ae.kuznetsov@yandex.ru)

MOSKVIN E. A., Candidate of Engineering Sciences, Head of Section, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143912, Russian Federation; e-mail address: moskvilin-ru@mail.ru)

ABSTRACT

Main attention in the real paper is given to problems of examination modern treatment by supplied of the extinguishing liquid compositions in fire areas, in particular, the effectiveness improvement problem of the methods and fire extinguishment mechanisms by using of liquid flows.

Modern atomization technologies of the extinguishing liquid compositions were separated. Main promising atomization technologies of the extinguishing liquid compositions were analyzed. The analysis of theoretical and experimental researches was carried out in the field of droplets evaporation liquid compositions in the flames. It was showed that over feeding of the extinguishing liquid during a long time interval will allow to put out of eliminate the ignition, however, it will cause a strong flow of the it is inappropriate.

It was found that not only composition and mass of the extinguishing liquid are important, but concentration of droplets in the gas-droplet flow, its sizes, distance between them its and other analysed factors.

Keywords: water; droplets; vapor-water flow; evaporation; flame; fires; extinguishment.

REFERENCES

1. Deshevyykh Yu. I. Za god pozhary unichtozhayut v Rossii tselyy gorod so vsey infrastrukturoy [During a year the fires destroy in Russia the whole city with all infrastructure]. *Bezopasnost. Dostovernost. Informatsiya — Safety. Reliability. Information*, 2010, no. 89, pp. 10–11.
2. Garmyshev V. V., Khismatulin S. R., Timofeeva S. S. Zagryazneniye atmosfery ot pozharov v gorodskikh munitsipalnykh obrazovaniyakh Sibirskogo federalnogo okruga [Atmospheric pollution due to fires in urban municipal centers of Siberian federal district]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of National Research Irkutsk State Technical University*, 2013, no. 3 (74), pp. 48–53.
3. Brushlinskiy N. N., Isaeva L. K., Marinov S. I. Upravleniye ekologicheskim riskom pri pozharakh [The control of ecological risk at the fires]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy — Problems of Safety and Emergency Situations*, 1992, no. 2, pp. 28–39.
4. Burkanov A. K., Yegorov I. G., Volokhov V. V. *Pozhary: vliyaniye na okruzhayushchuyu sredu. Obzornaya informatsiya* [Fires: environmental influence. Survey information]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 1992. 18 p.
5. Garmyshev V. V. Otsenka ekologicheskogo riska pozharov v gorodskikh aglomeratsiyakh (na primere g. Irkutsk). Dis. kand. tekhn. nauk [Environmental risk assessment of the fires in metropolitan agglomeration (on the example of Irkutsk). Cand. techn. sci. diss.]. Irkutsk, 2003. 155 p.

6. Isaeva L. K., Serkov B. B. Ekologicheskiye posledstviya zagryazneniya vozdukha pri pozharakh v zhi-lykh zdaniyakh [Ecological consequence of ground-level concentration at the fires in apartment buildings]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy — Problems of Safety and Emergency Situations*, 1992, no. 2, pp. 39–49.
7. Kopylov N. P., Ryzhkov A. M., Khasanov I. R. Vzaimodeystviye pozharov s atmosferoy [Cooperation of the fires with the atmosphere]. *Yubileynyy sbornik trudov Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta protivopozharnoy oborony* [Anniversary collection of the works of the All-Russian Research Institute for Fire Protection]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 1997, pp. 137–157.
8. Anosova Ye. B., Kulayshin S. A. Problemy otsenki ekologicheskogo riska pozharov i avariyn na promyshlennyykh ob'yektakh [Problems of ecological risk of industrial fires and accidents]. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta — Vector of Science of the Tolyatti State University*, 2013, no. 2 (24), pp. 92–94.
9. Isaeva L. K. *Pozhary i okruzhayushchaya sreda* [Fires and environment]. Moscow, Kalan Publ., 2001. 222 p.
10. Feoktistova O. G. Nekotoryye voprosy monitoringa antropogennoy opasnosti na predpriyatiyakh GA [Some questions of anthropogenous danger monitoring at the civil aviation enterprises]. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoj aviatsii — Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, 2008, no. 127, pp. 152–156.
11. Pakhomov V. P., Rudakova L. V. Tekhnogennyye katastrofy gornopromyshlennogo kharaktera [Catastrophes formed by a technical reaction of the character of mining industries]. *Ekonomika regiona — Region Economy*, 2006, no. 2, pp. 23–36.
12. Tsarev V. A. Ekonomicheskiy ushcherb, nanesennyy prirodnyimi pozharemi v Rossii v 2010 godu [The economic disbenefit superimposed by the natural fires in Russia in 2010]. *Lesotekhnicheskij zhurnal — Forestry Engineering Journal*, 2012, no. 3, pp. 147–155.
13. Orekhov P. M. Borba s lesnymi pozharemi na territorii Vavozhskogo rayona Udmurtskoy Respubliki (istoricheskiy aspekt) [Forest fire management in the territory of Vavozh district, Udmurt Republic (historical aspect)]. *Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii — Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy*, 2012, no. 3 (32), pp. 63–65.
14. The state report on the status of protection of population and territories of the Russian Federation from emergency situations of natural and technogenic character in 2012 (in Russian). Available at: http://www.mchs.gov.ru/activities/Grazhdanskaja_zashhita/Gosudarstvennij_doklad_o_sostojanii_zashh (Accessed 1 December 2014).
15. Semyenov V. Yu. Ispolzovaniye vertoletov pri tushenii pozharov v gorodskikh usloviyakh [The use of helicopters in fire-fighting in urban environments]. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta — Vector of Science of the Tolyatti State University*, 2012, no. 1, pp. 76–79.
16. Gomonay M. V. *Sposob tusheniya pozhara v zdaniyakh i sooruzheniyakh s zakrytymi obyemami* [Method of fire fighting in buildings and structures with closed volume]. Patent RU, no. 2470684, publ. 27.12.2012.
17. Abyzbaev I. I. *Sposob tusheniya lesnykh pozharov i pozharov v vysotnykh zdaniyakh pri pomoshchi vertoletov* [Method to fight forest fires and fires in high buildings using helicopters]. Patent RU, no. 2392022, publ. 20.06.2010.
18. Moskvilov Ye. A. Primeneniye aviatsii dlya tusheniya lesnykh pozharov [Aviation usage for the suppression of forest fires]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2009, no. 1, pp. 89–92.
19. Pidzhakov A. Yu., Reshetskii F. N., Gavrilova O. V. Primeneniye aviatsii MChS Rossii pri tushenii lesnykh pozharov [Russian Emergency Ministry Aviation usage during the suppression of forest fires]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo 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.
20. Korshunov N. A., Kotelnikov R. V. Borba s lesnymi pozharemi: informatsionnoye obespecheniye s pomoshchyu aviasredstv [Forest fire fighter: information support by means of aviameans]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2008, no. 1, pp. 125–129.
21. Pashkov K. I. Problemy stanovleniya lesookhrannoy aviatsii v Baykalskom regione (konets 1930-kh – 1980-ye gody) [Problems of establishing forest service aviation in Baikal region (late 1930–1980)]. *Izvestiya Irkutskoy gosudarstvennoy ekonomicheskoy akademii — Izvestiya of Irkutsk State Economics Academy*, 2011, no. 4, pp. 231–233.

22. Kozlov V. N., Okunev S. M., Likhachev A. V., Shcherbakov A. P. Tusheniye lesnykh pozharov iskustvenno vyzvannymi osadkami [Extinguishment of forest fires by artificially induced rainfall]. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voyeykova — Works of the Main Geophysical Observatory of A. I. Voyeykov*, 2003, no. 552, pp. 152–163.
23. Khasanov I. R., Moskvilin Ye. A. Aviatsionnyye metody tusheniya krupnykh lesnykh pozharov [Aviation methods of extinguishment of large forest fires]. *Materialy XV nauchno-prakticheskoy konferentsii "Problemy goreniya i tusheniya pozharov na rubezhe vekov"* [Materials of XV Research-and-practice conference "Problems of burning and suppression of the fires at the turn of the century"]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 1999, part. 2, pp. 391–392.
24. Lebedev Yu. A., Lepeshinskiy I. A., Orestov I. A., Mikheev S. V., Kasyannikov V. A., Golovin V. V. Vertolet dlya borby s pozhami [Fire-fighting helicopter]. Patent RU, no. 2248916, publ. 27.03.2005.
25. Tsoy V. Ch. Sposob tusheniya pozharov "Smerch" [Fire extinguishing method "Smerch"]. Patent RU, no. 2252050, publ. 20.05.2005.
26. Tarasov Yu. D. Sposob tusheniya lesnykh pozharov i kompleks dlya yego osushchestvleniya [Method of extinguishing forest fires and complex for its realization]. Patent RU, no. 2465936, publ. 10.11.2012.
27. Payassis R. Protivopozharnyy vertolet [Water bomber helicopter]. Patent RU, no. 2347596, publ. 27.02.2009.
28. Paramoshko V. A. Vertolet dlya tusheniya pozhara [Fire helicopter]. Patent RU, no. 2451625, publ. 27.05.2012.
29. Krysov P. V., Yefremov S. L., Pyshnyy A. R., Sakhatkiy S. G. Sposob tusheniya pozhara melkoraspylennoy vodoy [Method of extinguishing fire with finely pulverised water]. Patent RU, no. 2457877, publ. 10.08.2012.
30. Bondar A. A., Reshetov A. P., Ivanov A. Yu. Matematicheskoye modelirovaniye vremeni tusheniya pozharov tonkoraspylennoy vodoy po rezultatam eksperimenta v zamknutykh obyemakh [Mathematical modelling of time of suppression of fires thin the sprayed water (TSW) by results of experiment in the closed volumes] *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii — Bulletin of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2012, no. 1, pp. 82–88.
31. Baratov A. N., Zabegaev V. I., Tsarichenko S. G. Sposob tusheniya pozhara raspylennoy vodoy s dobavkami [Method of fire extinguishing by means of dispersed water with additives]. Patent RU, no. 2403927, publ. 20.11.2010.
32. Gergel V. I., Tsarichenko S. G., Polyakov D. V. Pozharotusheniye tonkoraspylennoy vodoy ustanovkami vysokogo davleniya operativnogo primeneniya [Fire extinguishing by finely dispersed water from high-pressure installations of on-line application]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2006, no. 2, pp. 125–132.
33. Chirko A. S., Karpyshev A. V., Dushkin A. L., Matushkin V. V., Segal M. D. Povysheniye protivopozharnoy zashchity podzemnykh ob'yektov megapolisov na osnove peredovykh tekhnologiy generatsii elektrobezopasnykh potokov tonkoraspylennoy vody [Fire precautions protection increase of underground facility of megalopolises on the basis of trendsetting technologies of generation of electrical safety flows of water spray]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy — Problems of Safety and Emergency Situations*, 2006, no. 5, pp. 29–34.
34. Dushkin A. L., Karpyshev A. V., Segal M. D. Optimizatsiya parametrov potokov tonkoraspylennykh ognetushashchikh veshchestv [Optimization of flow parameters of fine-sprayed fire extinguishing substances]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2010, vol. 19, no. 1, pp. 39–44.
35. Kopylov N. P., Chibisov A. L., Dushkin A. L., Kudryavtsev Ye. A. Izucheniye zakonornostey tusheniya tonkoraspylennoy vodoy modelnykh ochagov pozhara [Studying of standardized fire source extinguishment regularities by water spray]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2008, no. 4, pp. 45–58.
36. Korolchenko D. A. Izmeneniye kharakteristik goreniya goryuchey zhidkosti pri tushenii tonkoraspylennoy vodoy [Changes in burning characteristics of the combustible liquid during suppression by finely atomized water]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 5, pp. 79–80.
37. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysoznykh zdaniyakh [Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems]. *Vestnik MGSU — Vestnik MGSU*, 2011, vol. 2, no. 1, pp. 331–335.
38. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysoznykh zdaniyakh [Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 9, pp. 54–57.

39. Dinh Cong Hung, Korolchenko A. Ya., Okhromenko A. S. Pozharotusheniye tonkoraspylennoy vodoy v otsekakh vysotnogo zdaniya [The Influence of water mist fire-extinguishing in case of fire in high-rise building]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 3, pp. 63–66.
40. Karpyshev A. V., Dushkin A. L., Glukhov I. S., Segal M. D. Ispolzovaniye tonkoraspylennoy vody dlya povysheniya protivopozharnoy zashchity atomnykh elektrostantsiy [Use of water spray for increase of fire-suppression protection of nuclear power plants]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy — Problems of Safety and Emergency Situations*, 2006, no. 5, pp. 34–44.
41. Karpyshev A. V., Dushkin A. L., Ryazantsev N. N., Afanasyev A. A., Matushkin V. V., Segal M. D. Razrabotka vysokoeffektivnogo universalnogo ognetyashitelya na osnove generatsii struy tonkoraspylennykh ognetyashchikh veshchestv [Development of the high efficiency all-purpose extinguisher on the basis of generation of sprayed fire-fighting agent jets]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2007, vol. 16, no. 2, pp. 69–73.
42. 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 with use of water spray at power plants]. *Energetik — Power Engineer*, 2008, no. 6, pp. 37–38.
43. 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.
44. Andryushkin A. Yu., Pelekh M. T. Polucheniye tonkoraspylennoy vody gazodinamicheskimi raspyleniyem [Production of the water spray by the gasdynamic atomization]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii — Bulletin of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2012, no. 1, pp. 53–58.
45. Kochetov O. S., Stareeva M. O. Ustanovka dlya tusheniya pozhara tonkoraspylennoy vodoy [Plant for fire fighting with water mist]. Patent RU, no. 2472552, publ. 20.01.2013.
46. Barsukov V. D., Basalaev S. A., Goldaev S. V., Minkova N. P. Sposob pozharotusheniya v pome-shcheniyakh i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya [Method of fire extinction indoors and device for method implementation]. Patent RU, no. 2370292, publ. 20.10.2009.
47. Petrov I. I., Zabegaev V. I. Sposob polucheniya tonkoraspylennoy vody i ustroystvo dlya yego realizatsii [Method of obtaining finely dispersed water and device for its realisation]. Patent RU, no. 2415688, publ. 10.04.2011.
48. Maslak V. G., Korolev Yu. S. Sposob tusheniya pozharov vodoy [Method of fires suppression by water]. Patent SU, no. 1247019, publ. 30.07.86.
49. Maslak V. G., Korolev Yu. S., Purgin B. A. Sposob tusheniya pozhara raspylennoy vodoy [Method of fires suppression by atomized water]. Patent SU, no. 1789234, publ. 23.01.93.
50. Korobeynichenko O. P., Shmakov A. G., Chernov A. A., Kutsenogiy K. P., Makarov V. I., Kopylov S. N., Baratov A. N. Sposob tusheniya pozhara [Method for fire extinguishing]. Patent RU, no. 2396095, publ. 10.08.2010.
51. Kononov B. V., Pak Z. P. Sposob tusheniya pozhara i ustanovka pozharotusheniya [Fire extinguishing method and apparatus]. Patent RU, no. 2050866, publ. 27.12.1995.
52. Ishmatov A. N., Vorozhtsov B. I. Metod issledovaniya tonkodispersnogo raspyleniya zhidkostey [The method for the study of fine liquid atomization]. *Optika atmosfery i okeana — Atmospheric and Oceanic Optics*, 2012, vol. 25, no. 7, pp. 653–656.
53. Salamov A. A. Sovremennaya sistema pozharotusheniya “vodyanoy tuman” vysokogo davleniya [“Water fog” — modern high pressure fire extinguishing system]. *Energetik — Power Engineer*, 2012, no. 3, pp. 16–18.
54. Kaplan A. L., Karishin A. V., Zhuykov D. A., Ilyushin A. V. Sposob tusheniya pozharov i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya [Method to extinguish fire and relevant device]. Patent RU, no. 2372122, publ. 10.11.2009.
55. Roenko V. V., Aleshkov M. V., Stepanov K. N., Pryanichnikov V. A., Korovin G. K., Sharikov A. V., Nesterov V. M. Ustroystvo dlya tusheniya pozhara peregretoy vodoy [Device for extinguishing fire with superheated water]. Patent RU, no. 2030194, publ. 10.03.95.
56. Snegiryev A. Yu., Sazhin S. S., Talalov V. A., Savin M. V. Aprobatsiya modeli teploobmena i ispare-niya kapel dispergirovannoy zhidkosti [Approbation of heat exchange and evaporation of dispersed liquid droplets]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekh-nicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskiye nauki — St. Petersburg State Polytechnical Univer-sity Journal. Physics and Mathematics series*, 2011, vol. 2, no. 122, pp. 48–59.

57. 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.
58. Strizhak P. A. Chislennoye issledovaniye usloviy ispareniya sovokupnosti kapel vody pri dvizhenii v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Numerical investigation of evaporation conditions for set of water drops at the moving after high temperature gas mixture]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 8, pp. 26–31.
59. 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 in the interaction of the dispersed burning phlegmatizer with high-temperature combustion products]. *Butlerovskiyе soobshcheniya — Butlerov Communications*, 2012, no. 8, pp. 86–94.
60. Strizhak P. A. Chislennyy analiz protsessa ispareniya kapli, dvizhushcheysya v struye vody cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [The numerical analysis of the droplet evaporation process moving in the fire jet through the high-temperature combustion products]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 9, pp. 17–22.
61. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Strizhak P. A. Chislennoye issledovaniye usloviy vzaimodeystviya dispergirovannogo flegmatizatora goreniya s vysokotemperaturnymi produktami sgoraniya [Numerical investigation of the cooperation 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.
62. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Chislennoye issledovaniye teplomassoperenosa pri dvizhenii “tandema” kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Numerical research of 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, no. 12, pp. 531–538.
63. 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.
64. 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.
65. 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 waterspray conditions influence on temperature in the trace of “water shell”]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 24–31.
66. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Vliyaniye formy kapli vody na rezultaty matematicheskogo modelirovaniya yeye ispareniya pri dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Influence of a water droplet shape on mathematical modeling results of its evaporation when moving through high-temperature combustion products]. *Teplovyye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Equipment*, 2013, no. 6, pp. 254–261.
67. 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.
68. 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]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 7, pp. 11–21.
69. 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]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 9, pp. 57–63.
70. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Vliyaniye struktury raspyslennoy vody na temperaturu i kontsentratsiyu produktov goreniya [Influence of water spray structure on the temperature and concentration of combustion products]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2013, no. 4, pp. 47–53.

71. 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.
72. Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Effektivnost ispolzovaniya teploty paroobrazovaniya pri vozdeystvii “vodyanym snaryadom” na plamya [Efficiency of evaporation heat using at the fire fighting by typical “water shell”]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy — Problems of Safety and Emergency Situations*, 2013, no. 6, pp. 82–91.
73. Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Rol dispersnosti vody, sbrasyvayemoy aviatsiyey v zonu goreniya lesnykh massivov [Role of water dispersibility dropping by aircraft in the combustion area of forest massifs]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti — Safety of Work in the Industry*, 2014, no. 1, pp. 43–49.
74. Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Vliyaniye temperatury v slede “vodyanogo snaryada” na usloviya termicheskogo razlozheniya tipichnogo lesnogo goryuchego materiala [Influence of temperature in a trace of “a water shell” on the thermal decomposition conditions of typical forest fuel material]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy — Problems of Safety and Emergency Situations*, 2014, no. 1, pp. 48–55.
75. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Numerical investigation of water droplets shape influence on mathematical modeling results of its evaporation in motion through a high-temperature gas. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, Article ID 920480. 8 p.
76. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. The motion of a manifold of finely dispersed liquid droplets in the counterflow of high temperature gases. *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40, no. 6, pp. 499–502.
77. Vysokomornaya O. V., Zakharevich A. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnaya otsenka izmeneniya razmerov i skorostey dvizheniya kapel vody pri ikh peremeshchenii v oblasti vysokotemperaturnykh produktov sgoraniya [Experimental estimation change of the sizes and motion velocities of water droplets when moving in the area of high-temperature combustion products]. *Teplovyye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Equipment*, 2014, vol. 6, no. 5, pp. 214–220.
78. 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, no. 4, pp. 568–575.
79. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Analiz vliyaniya nachalnoy temperatury raspylennoy vody na integralnyye kharakteristiki yeye ispareniya pri dvizhenii cherez zonu “goryachikh” gazov [Analysis of the effect exerted by the initial temperature of atomized water on the integral characteristics of its evaporation during motion through the zone of “hot” gases]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 2, pp. 450–458.
80. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye vliyaniya nachalnoy temperatury raspylennoy vody na intensivnost yeye ispareniya pri dvizhenii cherez plamya [Experimental investigation of initial temperature for sprayed water influence on the evaporation intensity at the moving through flame]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, no. 3, pp. 12–21.
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]. *Butlerovskiyе soobshcheniya — Butlerov Communications*, 2013, vol. 35, no. 9, pp. 38–46.
82. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Osobennosti ispareniya dvukh kapel vody, dvizhushchikhsya posledovatelno cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Evaporation features of two water droplets when moving in tandem through high-temperature combustion products]. *Teplofizika i aeromekhanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 269–272.
83. Volkov R. S., Zabelin M. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Vliyaniye nachalnoy skorosti dvizheniya kapel raspylennoy zhidkosti na intensivnost ikh ispareniya v oblasti vysokotemperaturnykh produktov sgoraniya [Influence of initial velocity of the movement of the mist spray droplets on intensity of its evaporation in the area of high-temperature combustion products]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti — Safety of Work in the Industry*, 2014, no. 3, pp. 35–40.
84. Volkov R. S., Zabelin M. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Vliyaniye razmerov i skorostey vvoda kapel vody v zonu goreniya na effektivnost yeye ispolzovaniya pri tushenii pozharov v pomeshcheniyakh [Influence of the sizes and velocities of input of water droplets in a combustion area on efficiency of its use at suppression of the compartment fires]. *Teplovyye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Equipment*, 2014, vol. 23, no. 4, pp. 157–163.

85. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye polnoty ispareniya raspylennoy vody pri yeye dvizhenii cherez plamya [Experimental investigation of evaporation integrity for sprayed water at moving through flame] *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 10, pp. 15–24.
86. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. O nekotorykh fizicheskikh zakonomernostyakh ispareniya raspylennoy vody pri dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [About some physical regularities of the atomized 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.
87. Volkov R. S., Zhdanova A. O., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye integralnykh kharakteristik ispareniya tipichnykh raspylenykh tushashchikh zhidkostey pri ikh dvizhenii cherez plamya [Experimental investigation of integral evaporation characteristics of the typical sprayed extinguishing liquids at its movement through a flame]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti — Safety of Work in the Industry*, 2013, no 12, pp. 33–37.
88. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Vliyaniye nachalnykh parametrov raspylennoy vody na kharakteristiki yeye dvizheniya cherez vstrechnyy potok vysokotemperaturnykh gazov [Influence of the initial parameters of spray water on the characteristics of its motion through a counter flow of high-temperature gases]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2014, vol. 84, no. 7, pp. 15–23.
89. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye integralnykh kharakteristik ispareniya presnoy i solenoy vody pri dvizhenii cherez plamya [Experimental investigation of integrated evaporation characteristics for fresh and salty water at moving through the flame]. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya — Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2014, no. 2, pp. 18–23.
90. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye vliyaniya nachalnoy temperatury vody i sodержaniya v ney primesey soley na intensivnost ispareniya v zone plameni pri podache v vide krupnykh monolitnykh kapel i tonkoraspylennoy strui [Experimental investigation into influence of initial water temperature and salt mixture on the evaporation intensity in a flame zone during discharge of large monolithic drops and water spray]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2014, no. 2, pp. 93–98.
91. Volkov R. S., Zabelin M. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Vliyaniye tverdykh vklyucheniy 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.